



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TM 141585**

**PEMODELAN DAN ANALISA RESPON  
DINAMIS DAN ENERGI BANGKITAN PADA  
SUSPENSI UDARA KERETA API LISTRIK  
DENGAN *BOGIE* TIPE MB-514**

**RANGGA EVALGA MARBUN  
0211134000155**

**Dosen Pembimbing  
Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D.**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2018**



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TM 141585**

**PEMODELAN DAN ANALISA RESPON  
DINAMIS DAN ENERGI BANGKITAN PADA  
SUSPENSI UDARA KERETA API LISTRIK  
DENGAN *BOGIE* TIPE MB-514**

**RANGGA EVALGA MARBUN  
02111340000155**

**Dosen Pembimbing  
Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D.**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2018**

**FINAL PROJECT - TM 141585**

**MODELING AND ANALYSIS OF DYNAMIC  
RESPONSE AND ENERGY GENERATION IN  
AIR SUSPENSION ELECTRIC RAILWAY WITH  
MB-514 BOGIE TYPE**

**RANGGA EVALGA MARBUN**  
**02111340000155**

**Supervisor**  
**Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D.**

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT**  
**FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY**  
**INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**  
**SURABAYA 2018**

**PEMODELAN DAN ANALISA RESPON DINAMIS DAN  
ENERGI BANGKITAN PADA SUSPENSI UDARA KERETA  
LISTRIK DENGAN *BOGIE* TIPE MB-514**

**TUGAS AKHIR**

Digunakan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**Rangga Evalga Marbun**

NRP 02111340000155

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D. (Pembimbing)  
NIP. 195106051978031003
2. Ir. Yusuf Kaelani, MSc.Eng. (Penguji I)  
NIP. 196511031990021001
3. Ir. Julendra B. Ariatedja, MT (Penguji II)  
NIP. 196807061999031004
4. Dr. Eng. UNGGUL WASIWITONO, ST., M.Eng.Sc. (Penguji III)  
NIP. 197805102001121001

**SURABAYA  
JULI 2018**

**PEMODELAN DAN ANALISA RESPON DINAMIS  
DAN ENERGI BANGKITAN PADA SUSPENSI  
UDARA KERETA API LISTRIK DENGAN *BOGIE*  
TIPE MB-514**

**Nama** : Rangga Evalga Marbun  
**NRP** : 02111340000155  
**Jurusan** : Teknik Mesin FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.sc.,  
Ph.D.

**ABSTRAK**

*Transportasi umum merupakan hal yang sangat penting dalam kemajuan suatu negara, di negara-negara maju transportasi mengalami perkembangan yang cukup pesat belakangan ini dimana untuk dapat memaksimalkan fungsi kerjanya transportasi harus memiliki efisiensi yang tinggi sehingga dilakukan beberapa cara antara lain dengan kinetic energy recovery system (KERS) yaitu sistem yang memanfaatkan energi kinetik dari kendaraan yang sedang melaju untuk di serap dan disimpan menjadi energi listrik atau thermal energy recovery system (TERS) yaitu mengubah energi panas hasil pembakaran menjadi energi listrik yang di simpan dalam baterai. Namun demikian gerak vibrasi pada kendaraan masih merupakan sumber energi yang potensial untuk digunakan, oleh karena itu pada tugas akhir ini akan memodelkan dan menganalisa potensi yang mampu dibangkitkan pada suspense udara kereta listrik (commuter line).*

*Dalam tugas akhir ini kereta listrik akan dimodelkan dalam seperempat kendaraan dengan suspense udara yang menggunakan vampire model dan kemudian disimulasikan dengan program Simulink untuk mendapatkan grafik respon dinamis untuk dibandingkan dengan respon dinamis kereta api konvensional setelah itu dilakukan analisa energi bangkitan pada suspense udara berdasarkan grafik respon dinamisnya. Grafik respon*

*dinamisnya akan meliputi grafik perpindahan, kecepatan dan percepatan dari carbody dengan variasi input rel yang digunakan yaitu gelombang sinusoidal dengan amplitude 0.01, 0.02 dan 0.04 meter dan panjang gelombang 10 meter sedangkan variasi kecepatan yang digunakan yaitu 50 Km/jam dan 70 Km/jam.*

*Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa semakin besar amplitude input sinusoidal yang diberikan maka semakin besar pula eksitasi dari respon dinamisnya dan dari respon dinamis yang ada didapatkan energi bangkitan terbesar terdapat pada input amplitude 0.04 meter dengan kecepatan 70 Km/jam yaitu sebesar 256.23 watt (rms).*

**Kata kunci: Kereta listrik, suspense udara, Simulink, respon dinamis, energi bangkitan.**

# **MODELLING AND ANALYSIS OF DYNAMIC RESPONSE AND GENERATION ENERGI IN AIR SUSPENSION OF ELECTRIC TRAIN WITH TYPE MB-54 BOGIE**

**Name** : Rangga Evalga Marbun  
**NRP** : 02111340000155  
**Department** : Teknik Mesin FTI-ITS  
**Supervisor** : Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.sc., Ph.D.

## **ABSTRACT**

*Public transportation is important for a country development. In developed country, transportation has high development which to maximize the function, high efficiency is needed. That is why, there are several way such as kinetic energy recovery system (KERS), a system that take advantage of kinetic energy of the moving vehicle itself to be absorbed and kept to become electrical energy or thermal energy recovery system (TERS) which change thermal energy from combustion to electrical energy to be saved in the battery. However, vibration move of the vehicle is still potential energy source. Therefore, this final project will modelling and analyze available potential that can be generated from air suspense of electrical train (commuter line).*

*In this final project, commuter line will be modeled in a quarter vehicle with air suspense using vampire model. Then, it will be simulated using Simulink to get dynamic response graphic to be compared with conventional train dynamic response. After that, generation energy in air suspense will be analyzed using its dynamic response graphic. Dynamic response graphic will cover movement graphic, velocity and acceleration of the carbody with rail input variations are sinusoidal wave of 0.01, 0.02, and 0.04 amplitudes and wavelength of 10 meters, and also velocity variations of 50 km/hour and 70 km/hour.*

*From this research, it can be concluded that the higher amplitude of sinusoidal input given then the higher excitation of dynamic response. From the available dynamic responses, the highest generation energy is in input of 0.04 amplitude with velocity of 70 km/hour which is 256.23 watt (rms).*

**Keyword: electric train, air suspense, Simulink, dynamic response, generation energy**



## KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yesus Kristus, yang telah memberikan anugerahNya sehingga Tugas Akhir dengan judul **“Pemodelan dan Analisa Respon Dinamis dan Energi Bangkitan pada Suspensi Udara Kereta Api Listrik dengan Bogie Tipe MB-514”** ini terselesaikan dengan sangat baik. Tugas akhir ini disusun sebagai syarat kelulusan pendidikan Sarjana S-1 di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penyusunan Tugas Akhir ini dapat terlaksana dengan baik karena bantuan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua penulis, Ibu Ester Agustian Nainggolan dan Bapak Tumbur Lumban Batu atas segala doa, dan jerih payahnya selama ini, serta kepada kedua saudara penulis, Aprilia Marbun dan Pangeran Ringgit Marbun yang telah menjadi penyemangat pada pengerjaan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D, selaku dosen pembimbing Tugas Akhir ini yang telah mencurahkan ilmu, perhatian, waktu, tenaga, dan arahan dalam penyusunan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, ST., M.Eng.Sc, Bapak Ir. Yusuf Kaelani, MSc.E dan Bapak Ir. Julendra B. Ariatedja, MT selaku dosen penguji sidang Tugas Akhir yang telah memberikan ilmu, saran dan masukan untuk perbaikan Tugas Akhir ini.
4. Ibu Ika Dewi Wijayanti, ST., M.Sc., dan Bapak Achmad Syaifudin ST., M.Eng selaku dosen wali penulis yang telah banyak memberikan perhatian, pelajaran, waktu, tenaga, dan masukan yang membangun hingga penulis mampu mengembangkan diri selama berkuliah di ITS.
5. Keluarga besar Laboratorium Desain Otomotif tercinta khususnya Muhammad Alawy D., M. Choirul Anam serta seluruh teman –teman angkatan M56 yang sudah menemani penulis di kampus ini.

6. Teman-teman ITS Taekwondo Team terkhusus pada sdr. Pius Aditya K. R. dan Djakwan Widyo P. yang pernah ikut berjuang pada kepengurusan UKM Taekwondo ITS 2014-2015.
7. Segenap Dosen, Tenaga pendidik dan Karyawan Teknik Mesin, terima kasih atas ilmu yang telah diberikan.
8. Sdr. Agnes Cellyana N. beserta keluarga yang banyak memberikan semangat kepada penulis selama menyusun Tugas Akhir ini, serta pihak lain yang telah membantu penulis yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dan keterbatasan yang terdapat dalam penulisan Tugas Akhir ini. Sehingga penulis sangat mengharapkan segala bentuk kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>ABSTRAK.....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>v</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan .....	3
1.5 Manfaat .....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....</b>	<b>5</b>
2.1 Tinjauan Pustaka .....	5
2.1.1 Karakteristik Suspensi Udara pada Kendaraan .....	5
2.1.2 Potensi Energi Bangkitan pada Peredam.....	6
2.1.3 <i>Regenerative Energy</i> .....	8
2.1.4 Pemodelan Suspensi Udara .....	9
2.2 Dasar Teori.....	10
2.2.1 Kereta Api Listrik.....	10
2.2.2 Suspensi udara.....	14
2.2.3 Cara Kerja Suspensi Udara.....	16
2.2.4 <i>Fundamental of Vibration</i> .....	16
2.2.5 <i>Respon of Damped System under Harmonic Force</i> .....	18
2.2.6 <i>Multidegree of Freedom System</i> .....	21
2.2.7 Perhitungan Potensi Energi pada Sistem Peredam ...	24
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>27</b>
3.1 <i>Flowchart</i> Penelitian .....	27
3.2 Pemodelan Sistem Seperempat Kendaraan Kereta Api Listrik.....	29
3.3 Mendapatkan Respon Gerak <i>Carbody</i> .....	34
3.4 Perhitungan Potensi Energi yang Dapat di Panen .....	36
<b>BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>37</b>

4.1 Blok Diagram Simulink .....	38
4.2 Respon Kereta akibat Profil Rel dengan Kecepatan 50 Km/jam.....	39
4.2.1 Respon dinamis <i>Carbody</i> pada Eksitasi Sinusoidal dengan Amplitudo 0.02 m kecepatan 50 Km/jam dengan Suspensi Udara.....	40
4.2.2 Respon <i>Bogie</i> dan <i>Carbody</i> pada Eksitasi Sinusoidal dengan Amplitudo 0.01 m kecepatan 50 Km/jam dengan Suspensi Udara.....	41
4.2.3 Respon <i>Bogie</i> dan <i>Carbody</i> pada Eksitasi Sinusoidal dengan Amplitudo 0.04 m kecepatan 50 Km/jam dengan Suspensi Udara.....	43
4.2.4 Respon Dinamis <i>Carbody</i> pada Eksitasi Sinusoidal dengan Amplitudo 0.02 m kecepatan 70 Km/jam dengan Suspensi Udara.....	44
4.2.5 Respon <i>Bogie</i> dan <i>Carbody</i> pada Eksitasi Sinusoidal dengan Amplitudo 0.01 m kecepatan 70 Km/jam dengan Suspensi Udara.....	45
4.2.6 Respon <i>Bogie</i> dan <i>Carbody</i> pada Eksitasi Sinusoidal dengan Amplitudo 0.04 m kecepatan 70 Km/jam dengan Suspensi Udara.....	47
4.3 Potensi Daya dan Energi yang Mampu Terbangkitkan pada Suspensi Udara .....	49
4.3.1 Potensi Energi pada Suspensi Udara pada kecepatan 50 Km/jam.....	50
4.3.2 Potensi Energi pada Suspensi Udara pada kecepatan 70 Km/jam.....	52
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>57</b>
5.1 Kesimpulan .....	57
5.2 Saran.....	58
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>59</b>
<b>BIODATA PENULIS .....</b>	<b>61</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Potensi Energi yang Dapat Dimanfaatkan pada Suspensi Kendaraan[8].....	2
Gambar 2.1 Karakteristik Air Spring EC075000 [5].....	6
Gambar 2.2 Grafik Potensi Energi yang Dibangkitkan oleh VERS akibat Eksitasi Sinusoidal dengan $V(\text{Kecepatan}) = 50 \text{ Km/Jam}$ [6].....	7
Gambar 2.3 Grafik Potensi Energi yang Dibangkitkan oleh VERS akibat Eksitasi Sinusoidal dengan $V(\text{Kecepatan}) = 100 \text{ Km/Jam}$ [6].....	7
Gambar 2.4 <i>Vampire Air Spring Model (Vertical Direction)</i> [10].....	10
Gambar 2.5 Kereta Listrik[11] .....	11
Gambar 2.6 <i>Pantograf Single Arm</i> [11] .....	12
Gambar 2.7 Motor Traksi [11] .....	12
Gambar 2.8 Bogie MB-514[12] .....	13
Gambar 2.9 <i>Carbody</i> Kereta Listrik[11] .....	14
Gambar 2.10 Suspensi Udara[12] .....	15
Gambar 2.11 Getaran pada Senar Gitar[13].....	17
Gambar 2.12 Sistem dengan Spring dan Damper[2].....	18
Gambar 2.13 Grafik Karakteristik Damper System[2].....	19
Gambar 2.14 Sistem dengan 1 DOF (Single Degree of Freedom)[2].....	21
Gambar 2.15 Sistem dengan <i>Multy-degree of Freedom</i> [2] .....	22
Gambar 2.16 <i>Spring-Mass-Damper System</i> [17].....	23
Gambar 2.17 Model Awal (a) Pengembangan Model (b) .....	23
Gambar 2.18 <i>Free body diagram</i> pengembangan model .....	24
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	28
Gambar 3.2 Diagram Alir Pemodelan dan Penurunan Rumus....	30
Gambar 3.3 Gambar Fisik Suspensi Kereta Listrik.....	31
Gambar 3.4 Model Dinamis dari Suspensi Kereta Listrik.....	31
Gambar 3.5 <i>Free Body Diagram</i> .....	32
Gambar 3.6 Diagram Alir Mendapatkan Respon Dinamis.....	35

Gambar 4.1 Diagram Blok Sistem Seperempat Kendaraan Kereta Listrik .....	39
Gambar 4.2 Diagram Blok Energi Bangkitan Kereta Listrik .....	39
Gambar 4.3 Grafik Respon Perpindahan ( <i>displacement</i> ) pada Eksitasi Sinusoidal $A=0.02\text{m}$ dan $V=50\text{ Km/jam}$ dengan Suspense Udara .....	40
Gambar 4.4 Grafik Respon Kecepatan ( <i>velocity</i> ) pada Eksitasi Sinusoidal $A=0.02\text{m}$ dan $V=50\text{ Km/jam}$ dengan Suspense Udara .....	41
Gambar 4.5 Grafik Respon Perpindahan ( <i>displacement</i> ) pada Eksitasi Sinusoidal $A=0.01\text{m}$ dan $V=50\text{ Km/jam}$ dengan Suspense Udara .....	42
Gambar 4.6 Grafik Respon Kecepatan ( <i>velocity</i> ) pada Eksitasi Sinusoidal $A=0.01\text{m}$ dan $V=50\text{ Km/jam}$ dengan Suspense Udara .....	42
Gambar 4.7 Grafik Respon Perpindahan ( <i>displacement</i> ) pada Eksitasi Sinusoidal $A=0.04\text{m}$ dan $V=50\text{ Km/jam}$ dengan Suspense Udara .....	43
Gambar 4.8 Grafik Respon Kecepatan ( <i>velocity</i> ) pada Eksitasi Sinusoidal $A=0.04\text{m}$ dan $V=50\text{ Km/jam}$ dengan Suspense Udara .....	43
Gambar 4.9 Grafik Respon Perpindahan ( <i>displacement</i> ) pada Eksitasi Sinusoidal $A=0.02\text{m}$ dan $V=70\text{ Km/jam}$ dengan Suspense Udara .....	44
Gambar 4.10 Grafik Respon Kecepatan ( <i>velocity</i> ) pada Eksitasi Sinusoidal $A=0.02\text{m}$ dan $V=70\text{ Km/jam}$ dengan Suspense Udara .....	45
Gambar 4.11 Grafik Respon Perpindahan ( <i>displacement</i> ) pada Eksitasi Sinusoidal $A=0.01\text{m}$ dan $V=70\text{ Km/jam}$ dengan Suspense Udara .....	46
Gambar 4.12 Grafik Respon Kecepatan ( <i>velocity</i> ) pada Eksitasi Sinusoidal $A=0.01\text{m}$ dan $V=70\text{ Km/jam}$ dengan Suspense Udara .....	46

Gambar 4.13 Grafik Respon Perpindahan ( <i>displacement</i> ) pada Eksitasi Sinusoidal $A=0.04\text{m}$ dan $V=70\text{ Km/jam}$ dengan Suspense Udara .....	47
Gambar 4.14 Grafik Respon Kecepatan ( <i>velocity</i> ) Pada Eksitasi Sinusoidal $A=0.04\text{m}$ dan $V=70\text{ Km/jam}$ dengan Suspense Udara .....	47
Gambar 4.15 Grafik Daya Bangkitan pada Eksitasi Sinusoidal $A=0.01\text{m}$ dan $V=50\text{ Km/jam}$ .....	50
Gambar 4.16 Grafik Energi Bangkitan pada Eksitasi Sinusoidal $A=0.01\text{m}$ dan $V=50\text{ Km/jam}$ .....	50
Gambar 4.17 Grafik Daya Bangkitan pada Eksitasi Sinusoidal $A=0.02\text{m}$ dan $V=50\text{ Km/jam}$ .....	51
Gambar 4.18 Grafik Energi Bangkitan pada Eksitasi Sinusoidal $A=0.02\text{m}$ dan $V=50\text{ Km/jam}$ .....	51
Gambar 4.19 Grafik Daya Bangkitan pada Eksitasi Sinusoidal $A=0.04\text{m}$ dan $V=50\text{ Km/jam}$ .....	51
Gambar 4.20 Grafik Energi Bangkitan pada Eksitasi Sinusoidal $A=0.04\text{m}$ dan $V=50\text{ Km/jam}$ .....	52
Gambar 4.21 Grafik Daya Bangkitan pada Eksitasi Sinusoidal $A=0.01\text{m}$ dan $V=70\text{ Km/jam}$ .....	52
Gambar 4.22 Grafik Energi Bangkitan pada Eksitasi Sinusoidal $A=0.01\text{m}$ dan $V=70\text{ Km/jam}$ .....	53
Gambar 4.23 Grafik Daya Bangkitan pada Eksitasi Sinusoidal $A=0.02\text{m}$ dan $V=70\text{ Km/jam}$ .....	53
Gambar 4.24 Grafik Energi Bangkitan pada Eksitasi Sinusoidal $A=0.02\text{m}$ dan $V=70\text{ Km/jam}$ .....	53
Gambar 4.25 Grafik Daya Bangkitan pada Eksitasi Sinusoidal $A=0.04\text{m}$ dan $V=70\text{ Km/jam}$ .....	54
Gambar 4.26 Grafik Energi Bangkitan pada Eksitasi Sinusoidal $A=0.04\text{m}$ dan $V=70\text{ Km/jam}$ .....	54

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Hasil Simulasi <i>Energy Recovery System</i> pada Kereta Listrik[9] .....	8
Tabel 3.1 Parameter pada Sistem Seperempat Kendaraan Kereta Listrik .....	36
Tabel 4.1 Perbandingan Respon Dinamis Kereta Api dengan Kereta Listrik pada Kecepatan 50 Km/jam .....	48
Tabel 4.2 Tabel 4.2 Perbandingan Respon Dinamis Kereta Api dengan Kereta Listrik pada Kecepatan 70 Km/jam.....	49
Tabel 4.3 Energi Bangkitan .....	55
Tabel 5.1 Perbandingan Respon Gerak Kereta Api dan Kereta Listrik pada Kecepatan 50 Km/jam .....	57
Tabel 5.2 Perbandingan Respon Gerak Kereta Api dan Kereta Listrik pada Kecepatan 70 Km/jam.....	57



# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Pada kehidupan manusia dewasa ini alat transportasi menjadi sangat penting dalam menghemat waktu perjalanan dari suatu tempat ke tempat lain dan sebagai sarana melakukan aktivitas setiap harinya, berbagai teknologi dikembangkan agar transportasi tersebut mampu bekerja secara optimal dan nyaman saat digunakan. Kereta api listrik merupakan transportasi umum yang sangat sering digunakan di kota-kota besar yang memiliki kepadatan penduduk yang tinggi seperti Jakarta, menurut data statistik jumlah penduduk Jakarta pada tahun 2016 sebanyak 10.3 Juta jiwa dengan luas wilayah 661.5 Km<sup>2</sup> mengharuskan adanya transportasi umum yang memadai dan bisa mengatasi peningkatan aktivitas pada kota tersebut. Kereta api listrik dipilih sebagai transportasi perkotaan karena memiliki kelebihan efisiensi mesin yang relatif tinggi dibanding kereta dengan mesin diesel serta dengan menggunakan *air suspension* memberikan kenyamanan yang baik bagi penumpang.

Masalah yang paling mendasar dari transportasi adalah energi yang dibutuhkan sebagai penggerak roda dan pendingin ruangan relatif besar mengharuskan adanya inovasi seperti *regenerative* dari berbagai sistem guna menopang kebutuhan energi. Sistem suspensi merupakan salah satu sistem yang memiliki potensi energi yang besar yang bisa dimanfaatkan yang berasal dari eksitasi massa bodi kendaraan akibat adanya gangguan seperti ketidak rataan pada jalan. Data menyebutkan bahwa suspensi pada kereta api memiliki potensi energi yang paling besar dari kendaraan lainnya seperti yang ditampilkan pada gambar 1.1 menjadi dasar pemikiran bagi penulis untuk membuat penelitian yang berfokus pada suspensi kereta api.



**Gambar 1.1** Potensi Energi yang Dapat Dimanfaatkan pada Suspensi Kendaraan[8]

Dari beberapa penelitian tentang *regenerative* yang pernah dilakukan pada suspensi kereta, belum ada yang pernah meneliti *regenerative* pada suspensi kereta listrik dikarenakan konstruksi pegas pada suspensi kereta listrik tidak menggunakan *coil spring* seperti pada kereta api diesel melainkan menggunakan *air spring* (pegas udara) dimana kelebihan dari pegas udara yaitu konstanta kekakuan pegasnya dapat di variasikan sesuai kebutuhan. Maka dari itu penelitian ini akan menganalisa potensi energi pada suspensi udara kereta listrik dengan menggunakan pemodelan seperempat bagian kendaraan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Beberapa permasalahan yang akan muncul dalam penyelesaian tugas akhir ini antara lain :

1. Bagaimana model dinamis dari suspensi udara pada kereta listrik
2. Bagaimana respon dinamis dari kereta listrik akibat penggunaan suspensi udara.

3. Berapa besarnya potensi energi yang dapat dibangkitkan pada suspensi udara.

### 1.3 Batasan Masalah

Untuk menyederhanakan permasalahan yang akan dibahas maka diambil beberapa batasan masalah yaitu :

1. Penelitian hanya berfokus pada suspensi sekunder (*air suspension*) dengan pemodelan seperempat kendaraan.
2. Profil jalan dimodelkan sebagai *input sinusoidal* dengan variasi amplitudo 1, 2, dan 4 cm dengan panjang gelombang 10 meter.
3. Variasi massa gerbong hanya pada kondisi berpenumpang penuh.
4. Variasi kecepatan kereta listrik yaitu pada kecepatan operasional 50 Km/jam dan kecepatan maksimum 70 Km/jam.
5. Variasi konstanta pegas dan peredam pada suspensi udara bernilai konstan yaitu pada tekanan 6 bar.
6. Tidak dilakukan perhitungan stabilitas dan kenyamanan pada kereta listrik.

### 1.4 Tujuan

Berikut ini beberapa tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian tugas akhir ini adalah :

1. Merancang model dinamis dari sistem suspensi udara pada kereta api listrik;
2. Menganalisa respon dinamis *carbody* akibat penggunaan suspensi udara dengan; dan
3. Menghitung energi yang dapat dibangkitkan dari suspensi udara.

### 1.5 Manfaat

Manfaat yang diharapkan dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Memberikan informasi mengenai pengaruh penggunaan suspensi udara terhadap respon dinamis dari *carbody*.
2. Memberikan sumber energi alternatif untuk memaksimalkan penggunaan energi pada kendaraan umum.

## **BAB II**

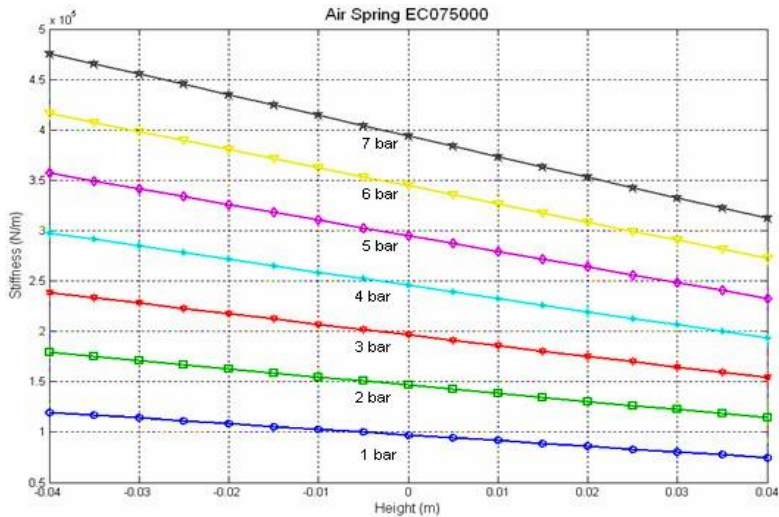
### **TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

#### **2.1 Tinjauan Pustaka**

##### **2.1.1 Karakteristik Suspensi Udara pada Kendaraan**

Kendaraan yang sering menggunakan suspensi udara adalah bus dan mobil-mobil pribadi sehingga penggunaannya pada kereta merupakan sebuah inovasi. Setiap inovasi yang berkembang pasti melalui berbagai macam uji coba guna menentukan apakah inovasi tersebut dapat di realisasikan atau tidak.

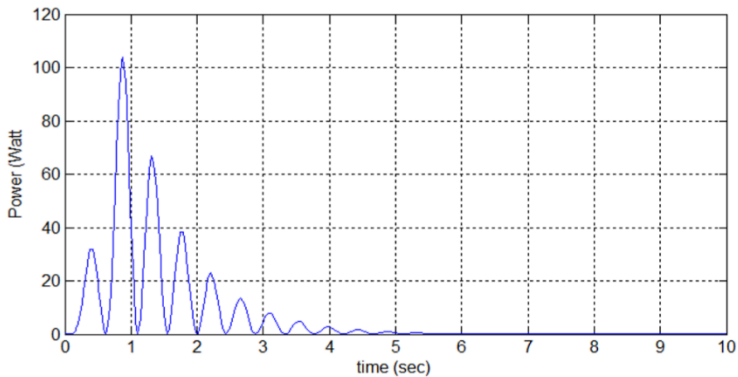
Pada tahun 2009 pernah dilakukan penelitian oleh seorang mahasiswa departemen teknik mesin yang bernama Azwin Raharjo, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui respon kendaraan yang menggunakan suspensi udara dengan variasi amplitudo akibat ketidakrataan jalan yaitu 5 cm untuk roda kanan dan 3 cm untuk roda kiri serta variasi dari frekuensi gaya eksitasi sebesar 1 Hz dan 2 Hz untuk mendapatkan tekanan yang sesuai pada *air spring* dengan kriteria kenyamanan Janeway. Kesimpulan yang didapat pada penelitian ini tekanan yang memenuhi kenyamanan paling baik yaitu 1 bar pada frekuensi 1 Hz dimana amplitudo ijinnya sebesar 50,87 mm. Grafik hubungan antara tekanan pada suspensi udara dengan konstanta kekakuan pegas dapat dilihat pada gambar 2.1.



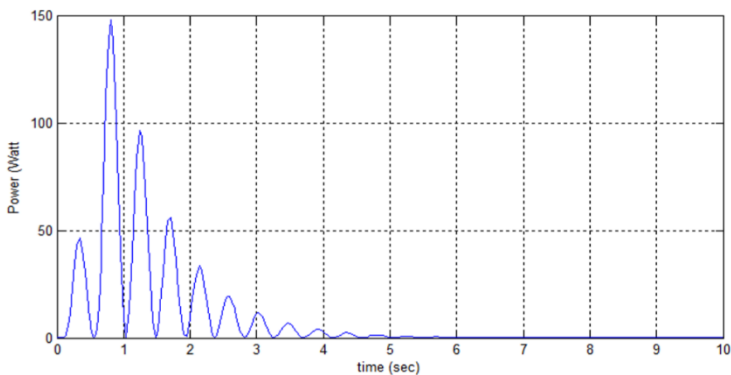
**Gambar 2.1** Karakteristik Air Spring EC075000 [5]

### 2.1.2 Potensi Energi Bangkitan pada Peredam

Penelitian yang lain yang menunjang pada penulisan tugas akhir ini datang dari salah satu mahasiswa Departemen Teknik Mesin yang bernama David Natalie dimana pada tahun 2012 dimana pada penelitian ini saudara David melakukan penambahan peredam yang diletakkan antar gerbong yang kemudian dilakukan simulasi pada program Simulink untuk menganalisa energi yang dapat terbangkitkan dari peredam tersebut akibat gerak vertical yang terjadi antar gerbong dengan variasi konstanta  $C_{vers} = 10.000$  dan  $20.000 \text{ Nm/s}$  dengan mengasumsikan kontur jalan seperti grafik sinusoidal dengan amplitudo 2 cm dan asumsi-asumsi lain seperti kecepatan bernilai konstan yaitu 50 Km/Jam dan 100 Km/Jam serta gerbong yang dianalisa hanya pada kondisi penuh, gambar 2.2 dan gambar 2.3 merupakan hasil dari simulasi energi bangkitan pada variasi kecepatan 50 Km/jam dan 100 Km/jam.



**Gambar 2.2** Grafik Potensi Energi yang Dibangkitkan oleh VERS akibat Eksitasi Sinusoidal dengan  $V(\text{Kecepatan}) = 50$  Km/Jam [6]



**Gambar 2.3** Grafik Potensi Energi yang Dibangkitkan oleh VERS akibat Eksitasi Sinusoidal dengan  $V(\text{Kecepatan}) = 100$  Km/Jam[6]

Dan dari penelitian ini di dapat kesimpulan bahwa energi terbesar yang dapat di panen yaitu energi yang terdapat pada peredam dengan konstanta terbesar yaitu  $C_{ver} = 20.000$  Nm/s

dengan kecepatan terbesar pula yaitu 100 Km/Jam dengan hasil energy sebesar 196 Watt.

### 2.1.3 *Regenerative Energy*

Sumber energi pada kendaraan semakin bervariasi seiring perkembangan zaman mulai banyak teknologi yang diterapkan guna memanfaatkan energi yang terbuang pada beberapa sistem seperti pengereman dan getaran, sistem pemanfaatan energi ini yang kemudian sering disebut sebagai *regenerative recovery system* yang berfungsi untuk memberikan sumber energi tambahan bagi kendaraan.

Beberapa sistem pada kendaraan yang bisa dimanfaatkan kerugian energi antara lain sistem pengereman dan sistem suspensi, energi yang bisa dimanfaatkan pada sistem pengereman mirip dengan energi pada suspensi yaitu energi kinetik, hanya saja energi kinetik pada pengereman didapat dari penurunan kecepatan kendaraan sedangkan energi kinetik pada suspensi didapat dari pergerakan massa kendaraan terhadap roda akibat ketidakrataan jalan. Walaupun tidak begitu besar energi ini cukup untuk mendukung beberapa sistem pada kendaraan seperti sistem pending ruangan.

Salah satu contoh pemanfaatan energi yaitu proyek yang bernama “Guidelines for Braking Energy Recovery Systems in Urban Rail Networks”<sup>[2]</sup> yang dilakukan pada bulan September 2014 oleh beberapa instansi seperti STIB (Brussels, Belgium), TfGM (Manchester, UK), moBiel (Bielefeld, Germany), RATP (Paris, France) dan RET (Rotterdam, The Netherlands), yaitu pemanfaatan kerugian energi pada pengeraman kereta listrik yang kemudian digunakan sebagai energi pendorong kereta lain dari posisi diam. Perancangan ini memiliki pencapaian yang cukup baik karena penghematan energi yang bisa dicapai sebesar 8% dari total energi yang digunakan dan besarnya energi yang di panen pada jangka waktu tertentu ditampilkan pada tabel 2.1

**Tabel 2.1** Hasil Simulasi *Energy Recovery System* pada Kereta Lisrik[9]

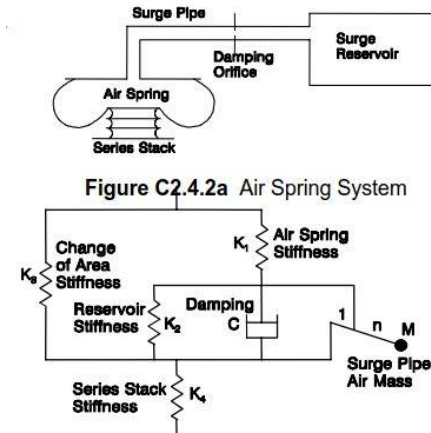


ESD	Time Period	Likely Energy Saved In			
		1 hour (kWh)	1 week (kWh)	1 year (kWh)	15 years (kWh)
Hagside	Peak	29.3	2,110	109,720	1,645,800
	Off-Peak	12.4	645	33,540	503,100
	Subtotal	N/A	2,755	143,260	2,148,900
Brooklands	Peak	36.4	2,620	136,240	2,043,600
	Off-Peak	12.4	645	33,540	503,100
	Subtotal	N/A	3,265	169,780	2,546,700
Total Energy Saved			6,020	313,040	4,695,600

### 2.1.4 Pemodelan Suspensi Udara

Dari artikel yang berjudul “Secondary Suspension of Railway Vehicles Air Spring Modelling: Performance and Critical Issues”<sup>[3]</sup>, yang dibuat oleh Laura Mazzola dan Mats Berg ada 6 bentuk pemodelan dari suspensi udara diantaranya yaitu “Thermodynamic model, Vampire model, Berg model, Nishimura model, Spring and Dashpot model dan Input Parameter model”. Dan pada penelitian kali ini, pemodelan yang digunakan pada suspensi udara menggunakan pemodelan *Vampire model*.

Pemodelan *Vampire* dipilih dari semua pemodelan yang ada karena pemodelan inilah yang sangat mempresentasikan dari suspensi udara, seperti pada gambar 2.4 pemodelan *Vampire* memodelkan suspense udara dengan menggunakan 3 konstanta kekakuan pegas yaitu *air spring stiffness* ( $K_1$ ), *reservoir stiffness* ( $K_2$ ) dan *change of area stiffness* ( $K_3$ ) juga 1 konstanta peredam yaitu *damping* ( $C$ ) yang memiliki nilai yang bervariasi bergantung pada tekanan yang diberikan ke kantung udara dan 1 konstanta kekakuan pegas *series stack stiffness* ( $K_4$ ) yang memiliki nilai yang tetap. Namun pada penelitian ini hanya akan mensimplifikasikan respon dinamis dan energi bangkitan pada tekanan maksimum dari suspense udara yaitu 6 bar.



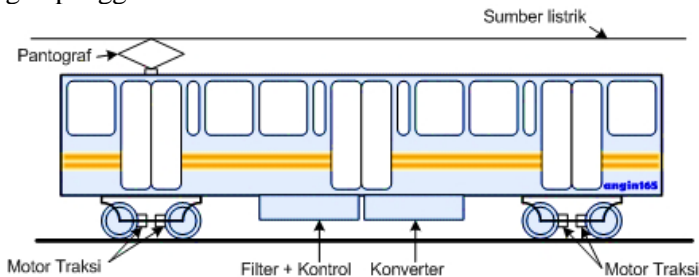
**Gambar 2.4** *Vampire Air Spring Model (Vertical Direction)*[10]

## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 Kereta Api Listrik

Kereta api merupakan alat transportasi umum yang memiliki jalur khusus untuk berjalan yang dinamakan rel, roda yang berjalan diatas rel terbuat dari logam paduan yang memiliki bentuk sedemikian rupa sehingga roda tidak lepas atau melenceng dari rel ketika kereta melaju pada kecepatan tinggi. Karena antara roda dengan rel sama-sama terbuat dari logam maka tentu terjadi *impact* yang cukup kuat sehingga dibutuhkan sistem untuk meminimalisir hal tersebut guna terciptanya kenyamanan pada penumpang, sistem ini yang disebut dengan sistem suspensi, sistem suspensi pada kereta ada 2 jenis yaitu suspensi primer dan suspensi sekunder, suspensi primer adalah suspensi yang terletak pada *bogie* bagian bawah yang berfungsi untuk meredam getaran pada *bogie* akibat ketidakrataan rel, sedangkan suspensi sekunder adalah suspensi yang terletak pada *bogie* bagian atas yang menghubungkan antara *bogie* dengan *carbody* yang berfungsi untuk meredam getaran pada *carbody* akibat getaran yang terjadi pada *bogie*.

Ditinjau dari muatannya, kereta terbagi 2 jenis yaitu kereta barang dan kereta penumpang sedangkan ditinjau dari tenaga penggerakanya kereta terbagi menjadi 3 yaitu kereta mesin diesel, kereta listrik dan kereta rel diesel dan listrik (KRDE). Ada beberapa perbedaan konfigurasi *bogie* pada kereta mesin diesel dan kereta listrik diantaranya pada kereta mesin diesel terdapat *bolster* sedangkan pada *bogie* kereta listrik tidak ada selain itu suspensi pada kereta mesin diesel terdiri dari *coil spring* dan *hydraulic damper* sedangkan pada suspensi kereta listrik menggunakan *air suspension* dan beberapa *bogie* pada kereta listrik memiliki penggerak yaitu motor listrik sedangkan pada *bogie* kereta mesin diesel tidak ada, gambar 2.5 merupakan gambar kereta listrik dengan penggerak motor traksi.



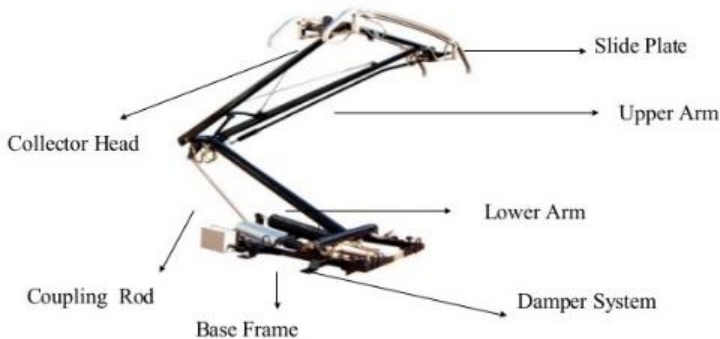
**Gambar 2.5** Kereta Listrik[11]

Dari gambar diatas akan dibahas secara singkat perangkat yang ada pada kereta api listrik beserta fungsinya.

### 2.2.1.1 *Pantograf*

Tipe *pantograf* ada 2 macam yaitu *diamond-shape* dan *single-arm* seperti pada gambar 2.6, kedua tipe ini memiliki fungsi yang sama yaitu untuk meyalurkan sumber listrik dari sumber diatas ke converter kemudian diteruskan ke motor listrik sehingga KRL dapat berjalan. *Pantograf* harus bersifat aerodinamis karena digunakan pada kecepatan yang relative tinggi selain itu *pantograf*

juga harus mampu kontak secara kontinyu dengan konduktor tanpa cepat aus.



**Gambar 2.6** *Pantograf Single Arm* [11]

#### 2.2.1.2 Motor AC atau motor DC

Motor listrik merupakan komponen yang mampu mengubah energy listrik menjadi energy gerak, ada 2 jenis motor listrik yaitu motor AC yaitu motor yang menggunakan arus AC (bolak balik) sedangkan motor DC yaitu motor yang menggunakan arus DC, kedua motor ini memiliki konfigurasi yang berbeda sesuai yang dibutuhkan, gambar 2.7 merupakan motor traksi DC yang digunakan pada kereta listrik dengan tegangan 1500 volt.

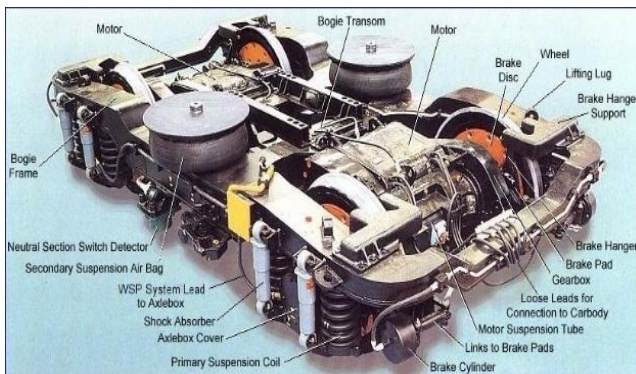


**Gambar 2.7** Motor Traksi [11]

### 2.2.1.3 *Bogie*

*Bogie* merupakan bagian penting dari kereta api yang memiliki 3 fungsi utama antara lain meningkatkan muatan, memudahkan perjalanan melalui tikungan dan meningkatkan kecepatan dan kenyamanan pada kereta, ada beberapa macam *bogie* yang digunakan pada kereta api namun disini hanya akan dibahas *bogie* yang digunakan pada kereta listrik. Pada kereta listrik *bogie* yang digunakan adalah *bogie* dengan tipe MB-514 seperti pada gambar 2.8 dengan kriteria sebagai berikut:

- Pada suspensi primer menggunakan *rubber bounded* sedangkan pada suspensi sekunder menggunakan suspensi udara (*air suspension*)
- Sistem pengereman menggunakan *actuator break system* yang berada pada setiap roda.
- Tidak memiliki *bolster* (*bolsterless*), sedangkan fungsi *bolster* digantikan oleh komponen lain yang bernama *center pivot*.
- *Reservoir* sebagai pemasukan udara pada suspensi udara.



**Gambar 2.8** Bogie MB-514[12]

### 2.2.1.4 *Carbody*

*Carbody* kereta listrik seperti pada gambar 2.9 berfungsi sebagai tempat muatan kereta, pada kereta penumpang *carbody*

dilengkapi sistem pengondisian udara sedangkan pada kereta barang tidak ada, perbedaan yang dimiliki *carbbody* kereta listrik hanya pada pintu kereta yaitu pada *carbbody* kereta listrik pintu yang digunakan adalah pintu otomatis sedangkan pada kereta mesin diesel masih menggunakan pintu manual. *Carbody* adalah komponen dengan persentase massa terbesar pada kereta.



**Gambar 2.9** *Carbody* Kereta Listrik[11]

### 2.2.2 Suspensi udara

Suspensi udara memiliki fungsi yang sama dengan suspensi dinamik lainnya yaitu untuk meredam atau meminimalkan getaran yang terjadi pada kendaraan akibat ketidakrataan permukaan jalan. Salah satu perbedaan dari kedua suspensi ini adalah terletak pada nilai konstanta kekakuan pegasnya. Jika pada sistem suspensi dinamik memiliki konstanta kekakuan pegas yang konstan, maka pada sistem suspensi air spring ini nilai konstanta pegasnya dapat diubah sesuai dengan kebutuhan dengan cara mengatur tekanan udara dalam air spring tersebut. Berikut ini merupakan bagian-bagian utama air spring:

### 2.2.2.1 Kompresor Udara

Kompresor berfungsi untuk memompa dan menciptakan tekanan pada udara. Mengingat sistem ini memanfaatkan tekanan udara sebagai peredam.

### 2.2.2.2 Tabung Penyimpanan

Tabung ini fungsinya sebagai penyimpan cadangan udara ketika sistem bekerja. Hal ini akan mencegah kekurangan udara saat sistem bekerja.

### 2.2.2.3 Selang Udara

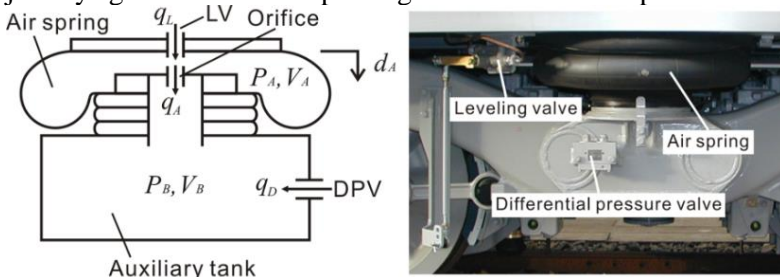
Selang ini akan menghubungkan tiap komponen yang harus dialiri udara bertekanan tinggi, oleh sebab itu selang udara haruslah kuat.

### 2.2.2.4 Kantong Udara

Kantong udara adalah tempat udara tersebut menerima beban kendaraan. Volume kantong udara akan berubah-ubah sesuai beban kendaraan.

### 2.2.2.5 Katup Selenoid

Katup ini menjadi pintu antara udara di dalam tabung penyimpanan dan kantong udara. Katup ini akan terbuka ketika udara di dalam kantong udara akan dibuang atau diisi. Untuk lebih jelasnya gambar 2.10 merupakan gambar fisik dari suspensi udara.



**Gambar 2.10** Suspensi Udara[12]

### 2.2.3 Cara Kerja Suspensi Udara

Saat mesin hidup, tenaga mesin akan menggerakkan kompresor udara. Kompresor akan mengirim udara bertekanan tersebut ke tabung penyimpanan. Udara bertekanan tersebut dimasukkan ke dalam kantung udara yang berada pada kaki-kaki melalui katup solenoid. Kantung udara layaknya *shock absorber* yang dapat bergerak naik turun namun di desain lebih rapat karena berisi udara bertekanan.

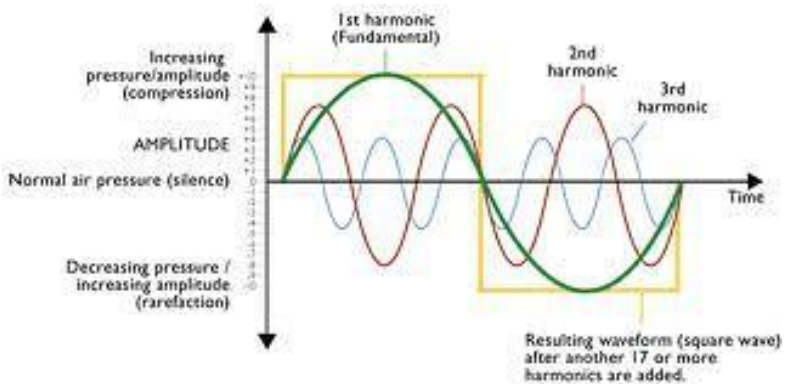
Karena udara bersifat dapat di kompresi, menyebabkan volume kantong udara akan berubah-ubah saat mendapat beban yang bervariasi, udara dalam kantong udara akan mengembang dan mengempis sesuai beban yang diterima. Hal itulah yang menyebabkan suspensi udara dapat menyerap getaran.

Hal lain yang unik pada sistem ini adalah, *ground clearance* dapat diatur sesuai keinginan dan keadaan, pada sistem ini terdapat tombol dan indikator untuk mengatur jumlah udara yang dikompresikan ke kantong udara. Sehingga ketinggian kantong udara dapat di sesuaikan yang akan mempengaruhi *ground clearance*.

### 2.2.4 Fundamental of Vibration

Getaran (*vibration*) adalah setiap gerakan yang berulang pada selang waktu tertentu, sebagai contoh senar gitar yang dipetik akan menghasilkan getaran berupa gerakan naik turun pada senar yang berulang pada selang waktu tertentu. Getaran itu yang menjadikan gitar dapat berbunyi juga untuk menghasilkan nada-nada yang berbeda gitar memiliki variasi panjang gelombang yang di perlihatkan pada gambar 2.11.





**Gambar 2.11** Getaran pada Senar Gitar[13]

Gitar merupakan salah satu contoh alat yang menggunakan getaran sebagai fungsi kerjanya namun masih banyak lagi alat dan jenis getaran yang ada disekitar kita, selanjutnya akan dijabarkan klasifikasi dari getaran:

#### **2.2.4.1 Getaran Bebas dan Getaran Paksa**

Getaran bebas adalah getaran yang tidak dipengaruhi oleh gaya dari luar, sedangkan getaran paksa adalah getaran yang dihasilkan karena adanya gaya dari luar yang diberikan ke sistem.

#### **2.2.4.2 Getaran Teredam dan Getaran Tidak Teredam**

Getaran yang kehilangan energi akibat adanya redaman baik dari udara atau peredam lainnya disebut getaran teredam dan sebaliknya getaran yang tidak memiliki media sebagai peredam disebut getaran tidak teredam dalam realita tidak ada jenis getaran tidak teredam.

#### **2.2.4.3 Getaran Deterministik dan Getaran Random**

Jika pada selang waktu tertentu, eksitasi pada getaran diketahui artinya getaran tersebut termasuk getaran deterministic dan sebaliknya.

### 2.2.5 Respon of Damped System under Harmonic Force

Pada keadaan tertentu sistem diberi gaya dengan persamaan  $F(t) = F_0 \cos \omega t$ , seperti pada gambar 2.12 maka persamaan gerak dari sistem adalah :

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + k x = F_0 \cos \omega t \quad (2.1)$$

**Gambar 2.12** Sistem dengan Spring dan Damper[2]

Dari persamaan diatas akan menghasilkan respon yang mendekati gerak harmonik dengan persamaan sebagai berikut :

$$x_p(t) = X \cos(\omega t - \phi) \quad (2.2)$$

Selanjutnya untuk menentukan  $X$  dan  $\phi$  yaitu amplitude dan sudut dari respon dengan cara mengganti persamaan (2.2) ke persamaan (2.1) maka didapat persamaan sebagai berikut :

$$X[(k - m\omega^2) \cos(\omega t - \phi) - c\omega \sin(\omega t - \phi)] = F_0 \cos \omega t \quad (2.3)$$

Dengan menggunakan hubungan persamaan trigonometri :

$$\cos(\omega t - \phi) = \cos \omega t \cos \phi + \sin \omega t \sin \phi$$

$$\sin(\omega t - \phi) = \sin \omega t \cos \phi - \cos \omega t \sin \phi$$

Di dapat  $X$  dan  $\phi$  sebagai berikut :

$$X = \frac{F_0}{[(k - m\omega^2)^2 + c^2 \omega^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.4)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{c\omega}{k - m\omega^2} \right) \quad (2.5)$$

Beberapa persamaan yang dibutuhkan untuk mendapatkan amplitudo dan sudut dari respon.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ undamped natural frequency}$$

$$\zeta = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2m\omega_n} = \frac{c}{2\sqrt{mk}}; \quad \frac{c}{m} = 2\zeta\omega_n$$

$$\delta_{st} = \frac{F_0}{k} = \text{deflection under the static force } F_0$$

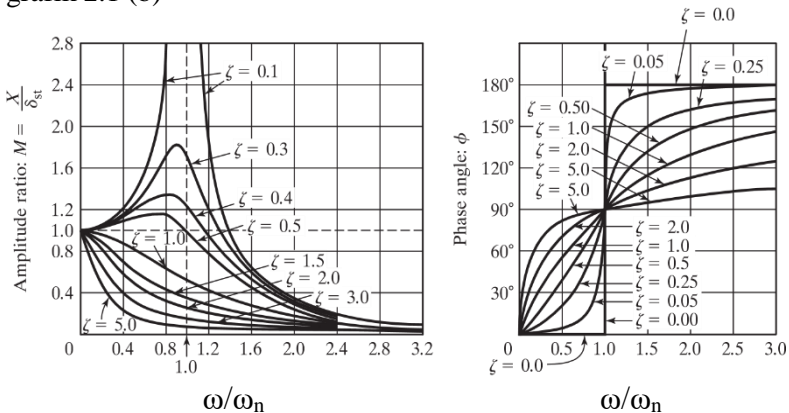
$$r = \frac{\omega}{\omega_n} = \text{frequency ratio}$$

Maka di dapat rasionya sebagai berikut :

$$\frac{X}{\delta_{st}} = \frac{1}{\left\{ \left[ 1 - \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right]^2 + \left[ 2\zeta \frac{\omega}{\omega_n} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}} = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \dots \dots \dots (2.6)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left\{ \frac{2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \right\} = \tan^{-1} \left( \frac{2\zeta r}{1-r^2} \right) \dots \dots \dots (2.7)$$

Dari persamaan diatas didapat karakteristik dari amplitudo (M) terhadap rasio frekuensi (r) yang ditampilkan pada grafik 2.1 (a), dan karakteristik dari sudut fase ( $\phi$ ) dan rasio frekuensi (r) pada grafik 2.1 (b)



**Gambar 2.13** Grafik Karakteristik Damped System[2]

1. Untuk sistem tanpa peredam ( $\zeta = 0$ ) dan  $M \rightarrow \infty$  saat  $r \rightarrow 1$

2. Untuk semua besar redaman ( $\zeta > 0$ ) akan mengurangi faktor amplitudo untuk semua besar gaya.
3. Untuk nilai  $r$  yang ditentukan, nilai redaman yang lebih tinggi akan mengurangi faktor amplitudo ( $M$ )
4. Pada kasus degenerasi gaya konstan (ketika  $r = 0$ ) maka  $M = 1$
5. Penurunan amplitudo dengan adanya peredam sangat signifikan setelah resonansi ( $r = 1$ )
6. Amplitudo getaran menjadi lebih kecil dengan meningkatnya nilai frekuensi gaya ( $M \rightarrow 0$  saat  $r \rightarrow \infty$ )
7. Untuk  $0 < \zeta < \frac{1}{\sqrt{2}}$  untuk nilai maksimum  $M$  terjadi saat (lihat persamaan 2.8)

$$r = \sqrt{1 - 2\zeta^2} \quad \text{or} \quad \omega = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2} \dots\dots\dots (2.8)$$

Terlihat amplitude pada getaran teredam lebih kecil dari frekuensi naturalnya  $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$

8. Hasil terbesar dari  $X$  adalah 2.9 (a) dan hasil saat  $\omega = \omega_n$  2.9 (b)

$$\left(\frac{X}{\delta_{st}}\right)_{max} = \frac{1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} ; \quad \left(\frac{X}{\delta_{st}}\right)_{\omega=\omega_n} = \frac{1}{2\zeta} \dots\dots\dots (2.9)$$

Persamaan 2.9 (a) dapat digunakan untuk penentuan eksperimental ukuran redaman yang ada dalam sistem. Dalam uji getar, jika amplitudo maksimum respon diukur, rasio redaman sistem dapat ditemukan dan sebaliknya jika jumlah redaman diketahui, seorang dapat membuat perkiraan amplitude maksimum getaran.

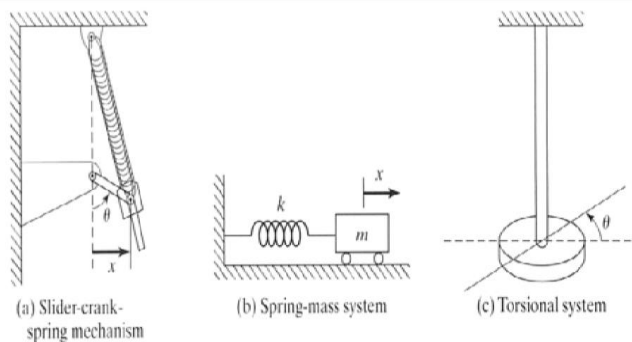
Solusi akhir dari respon geratan dengan peredam adalah  $x(t) = x_h(t) + x_p(t)$  dimana  $x_h(t) = X_0 e^{-\zeta\omega_n t} \cos(\omega_d t - \varphi_0)$ , sehingga penyelesaian lengkapnya menjadi :

$$X_0 e^{-\zeta\omega_n t} \cos(\omega_d t - \varphi_0) + X \cos(\omega t - \varphi) \dots\dots\dots (2.10)$$

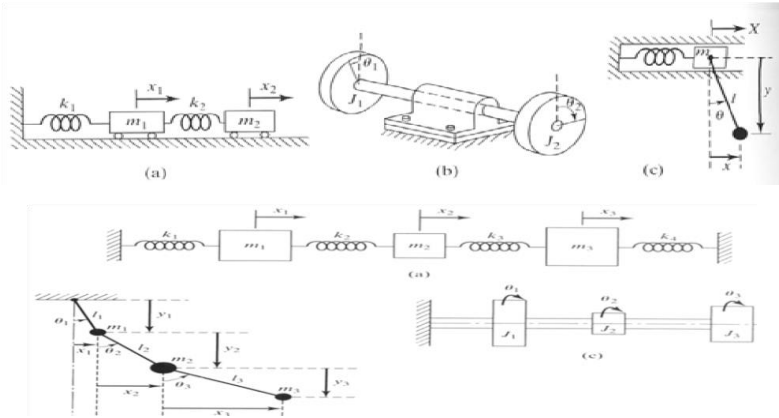
## 2.2.6 Multidegree of Freedom System

### 2.2.6.1 Degree of Freedom

Jumlah koordinat bebas yang dibutuhkan untuk menggambarkan gerak suatu sistem disebut derajat kebebasan atau *degree of freedom* (DOF). Suatu partikel bebas yang mengalami gerak umum dalam ruang akan memiliki tiga derajat kebebasan (sumbu x, sumbu y, dan sumbu z). Sedangkan benda kaku akan mempunyai enam derajat kebebasan, tiga komponen posisi dan tiga sudut yang menyatakan orientasinya. Secara garis besar sistem *degree of freedom* dibagi menjadi dua yaitu sistem dengan satu derajat kebebasan (1DOF) seperti pada gambar 2.14 dan sistem yang mempunyai lebih dari satu derajat kebebasan (multi DOF) seperti pada gambar 2.15. Untuk kedua sistem ini, dapat diperlihatkan contoh gambarnya:



**Gambar 2.14** Sistem dengan 1 DOF (Single Degree of Freedom)[2]

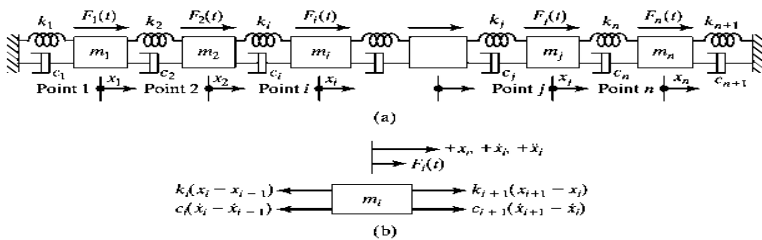


**Gambar 2.15** Sistem dengan *Multy-degree of Freedom*[2]

### 2.2.6.2 Persamaan gerak Sistem *Multy-degree of Freedom*

Berikut akan digambarkan pemodelan sederhana dari sistem *multy-degree of Freedom* serta persamaan gerak dengan menerapkan hukum gerak kedua Newton. Koordinat posisi dari setiap massa diukur dari posisi setimbang masing-masing massa, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.16 (a) dan *free body diagram* dari setiap massa ditunjukkan pada gambar 2.16 (b) bersama dengan arah positif yang diasumsikan untuk perpindahan, kecepatan, dan akselerasinya. Penerapan hukum kedua Newton dengan massa ke- $i$  ( $m_i$ )

$$\begin{aligned}
 m\ddot{x}_i &= -k_i(x_i - x_{i-1}) + k_{i+1}(x_{i+1} - x_i) - c_i(\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) \\
 &\quad + c_{i+1}(\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) + F_i ; \\
 i &= 2, 3, \dots, n-1 \dots\dots\dots (2.11)
 \end{aligned}$$

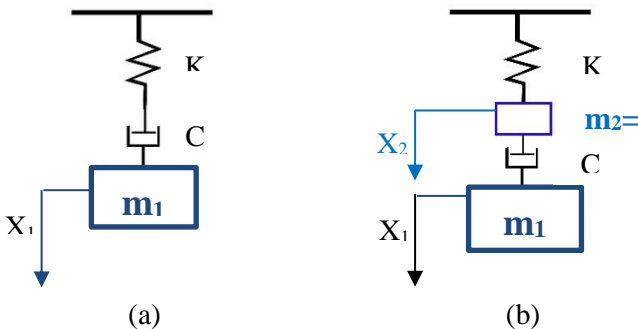


**Gambar 2.16** Spring-Mass-Damper System[17]

Dengan menurunkan persamaan 2.11 maka didapat :

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 - (c_1 - c_2) \dot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 + (k_1 - k_2)x_1 - k_2 x_2 &= F_1 \\ m_n \ddot{x}_n - c_n \dot{x}_{n-1} + (c_n + c_{n+1}) \dot{x}_n - k_n x_{n-1} + & \\ (k_n + k_{n+1})x_n &= F_n \dots \dots \dots (2.12) \end{aligned}$$

Untuk beberapa sistem tertentu dibutuhkan pengembangan model yaitu penambahan massa sebagai fungsi derajat kebebasan / DOF seperti pada gambar 2.17 untuk bisa menurunkan persamaan geraknya, setelah persamaan gerak didapat selanjutnya variabel dari massa tambahan tersebut di berikan konstanta 0 (nol) dengan begitu persamaan kembali mempresentasikan model fisiknya, berikut beberapa contoh sistem yang membutuhkan pengembangan model serta persamaan geraknya:



**Gambar 2.17** Model Awal (a) Pengembangan Model (b)

Pada FBD awal (gambar 2.17 a) hanya memiliki 1 massa dan seolah hanya memiliki 1 DOF pula padahal model tersebut harus di beri penambahan massa sehingga terlihat banyaknya DOF yang ada dengan begitu persamaan gerak bisa diturunkan, dan gambar 2.18 merupakan *free body diagram* dari sistem tersebut.



**Gambar 2.18** *Free body diagram* pengembangan model

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 &= -c\dot{x}_1 \\ m_2 \ddot{x}_2 &= c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k(x_2 - x_1) \quad ; \\ m_2 &= 0 \dots\dots\dots (2.13) \end{aligned}$$

### 2.2.7 Perhitungan Potensi Eergi pada Sistem Peredam

Energi yang dapat dimanfaatkan adalah yang berasal dari gaya redaman torsional pada suspensi udara yang dikalikan dengan kecepatan dari massa sistem, dimana gaya tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$F_d = C\dot{X}_{12}$$

maka dapat dituliskan pula perumusan energy sebagai berikut:

$$\begin{aligned} E &= (C\dot{X}_{12}) \dot{X}_{12} \\ E &= C\dot{X}_{12}^2 \end{aligned}$$

Keterangan :  $C$  = Konstanta redam suspense udara (Nm/s)

$\dot{X}_{12}$  = Kecepatan relatif masssa 1 dan massa 2 (m/s)



Penghitungan potensi energi nantinya dilakukan setelah proses simulasi pada program Simulink. Setelah proses simulasi maka akan diketahui respon gerak *carbody* meliputi respon perpindahan, kecepatan dan perpindahan dari gerak *carbody* tersebut. Respon yang digunakan dalam penghitungan potensi energi yang mampu terbangkitkan adalah respon kecepatan gerak relatif massa 1 dan massa 2 dalam hal ini adalah  $\dot{X}_{12}$ . Pada perumusan daya diatas C (konstanta redaman) yang digunakan untuk menghitung potensi energi terbangkitkan adalah C atau disebut konstanta redam dari suspensi udara.

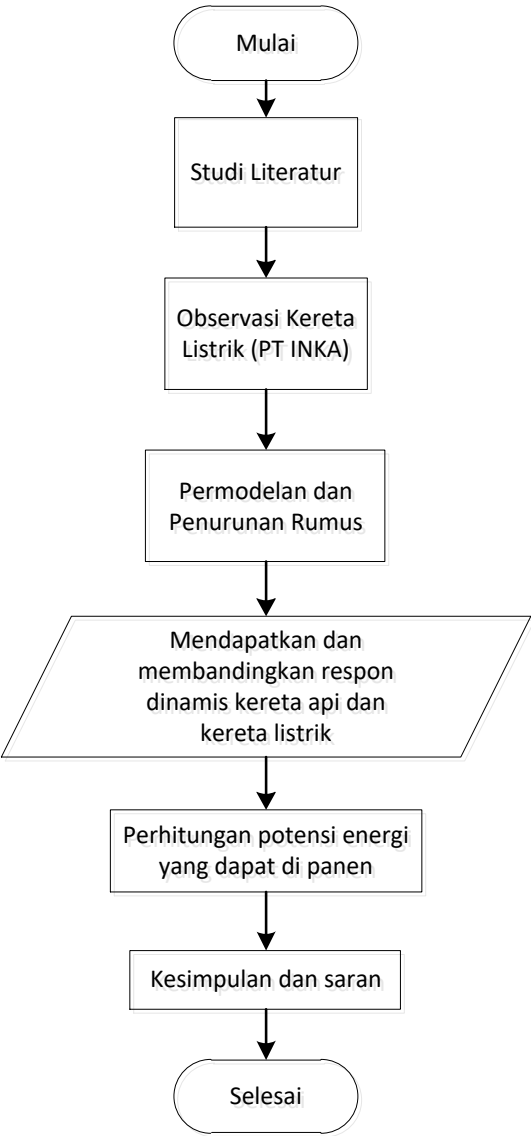
*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **3.1 *Flowchart* Penelitian**

Tugas akhir ini bertujuan untuk memodelkan dan menganalisa gerak *carbody* dari kereta api listrik sehingga mengetahui potensi energi yang mampu dibangkitkan oleh suspensi udara yang kedepannya dapat dimanfaatkan sebagai salah satu sumber energy, maka dari itu untuk mengetahui tujuan dari tugas akhir ini dibuat diagram alir sebagai berikut:



**Gambar 3.1** Diagram Alir Penelitian

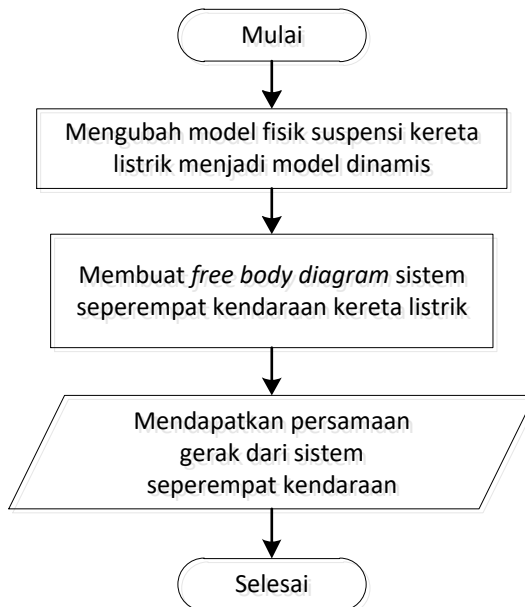
Pelaksanaan tugas akhir ini memiliki beberapa tahapan yang akan dijabarkan sebagai berikut:

1. Pertama dimulai dengan studi literatur mengenai *energy harvesting* yang diambil dari beberapa *paper* dan penelitian tugas akhir terdahulu.
2. Kedua, melakukan observasi pada kereta listrik (*commuterline*) seperti jenis *bogie* yang digunakan, sistem suspensi dan parameternya seperti konstanta kekakuan pegas dan konstanta peredam pada suspensi udara.
3. Ketiga, dilakukan pemodelan dari suspensi udara, berdasarkan beberapa model yang ada kemudian dipilih *Vampire model* karena model ini yang mendekati bentuk fisik dari suspensi udara. Kemudian dari model tersebut dilakukan penurunan rumus dengan menganalisa gaya-gaya yang bekerja didalamnya.
4. Keempat, mendapatkan respon dinamis kereta listrik dengan menggunakan *software* Matlab *Simulink* yang kemudian dibandingkan dengan respon dinamis kereta api dengan suspensi konvensional.
5. Kelima, dari grafik yang didapat yaitu grafik posisi, kecepatan dan percepatan dari *carbody* dilakukan perhitungan ataupun grafik potensi energi yang dapat dimanfaatkan.
6. Keenam, setelah mendapatkan hasil berupa grafik energi yang dapat dimanfaatkan kemudian dilakukan evaluasi berupa kesimpulan dan saran untuk penelitian selanjutnya.

### **3.2 Pemodelan Sistem Seperempat Kendaraan Kereta Api Listrik**

Pemodelan yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah pemodelan seperempat kendaraan dimana fokusannya ada pada sistem suspensi sekunder (*Air suspension*) yaitu menggunakan *Vampire model* dengan lima *degree of freedom* (DOF). Pemodelan sistem ini ditunjukkan dengan gambar 3.2 dibawah yang meliputi  $M_c$  sebagai massa *carbody* dalam kondisi

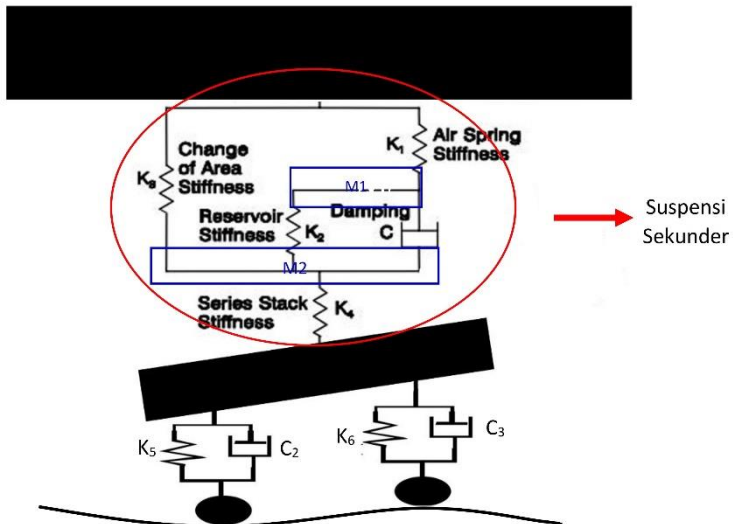
penyut (full load) dan  $M_b$  sebagai massa *bogie* dimana dalam hal ini *bogie* yang digunakan adalah *bogie* dengan tipe MB-514, selanjutnya  $K_r$  dan  $C_r$  berturut-turut adalah konstanta kekakuan pegas dan konstanta redaman pada sistem suspensi primer (*Rubber suspension*). Sedangkan  $K_1$  adalah konstanta kekakuan pegas pada suspensi sekunder (*Air suspension*),  $K_2$  adalah kekakuan pada *reservoir*,  $K_3$  adalah kekakuan yang disebabkan oleh perubahan area pada karet suspensi dan terakhir  $K_4$  adalah *series stack stiffness* sedangkan untuk peredam terdapat  $C_{as}$  yaitu peredam dari suspensi udara. Di bawah ini adalah gambar fisik dan pemodelan dari suspensi udara.



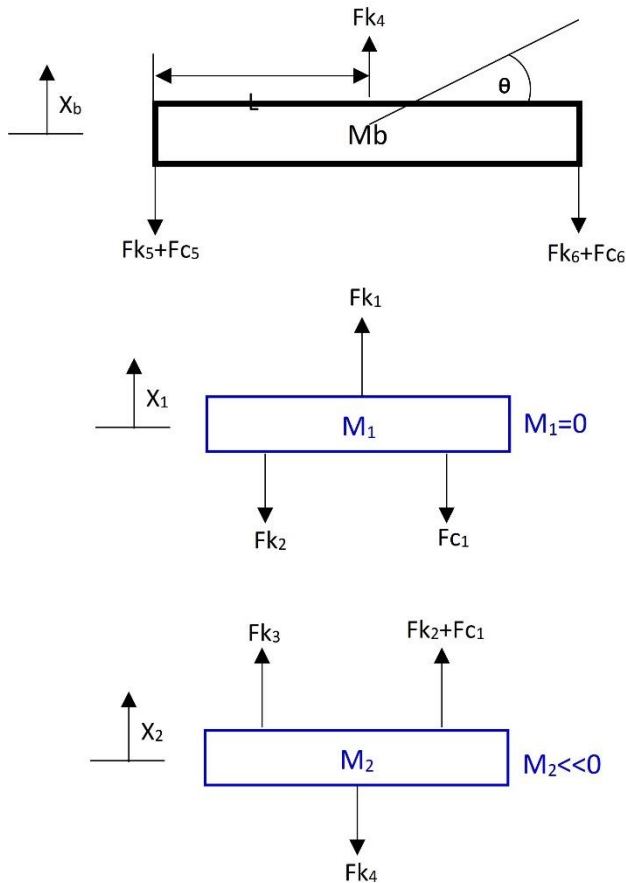
**Gambar 3.2** Diagram Alir Pemodelan dan Penurunan Rumus



**Gambar 3.3** Gambar Fisik Suspensi Kereta Listrik



**Gambar 3.4** Model Dinamis dari Suspensi Kereta Listrik



**Gambar 3.5** Free Body Diagram

Persamaan gerak dari sistem terlebih dahulu diturunkan dengan membangun *free body diagram* dari model fisik sistem yang telah disederhanakan. Berdasarkan *free body diagram* gambar 3.5, komponen gaya yang sejenis akan dijumlahkan dengan menggunakan hukum newton. Setelah didapatkan persamaan gerak untuk masing-masing kondisi, persamaan



tersebut diubah dalam bentuk persamaan *state variable* dengan cara merubah persamaan ke bentuk persamaan differensial ordo satu.

Persamaan gerak translasi pada *bogie*:

$$\begin{aligned}
 M_b \ddot{X}_b - Fk_5 - Fc_5 - Fk_6 - Fc_6 + Fk_4 &= 0 \\
 M_b \ddot{X}_b + k_5(y_1 - x_b + L\theta) + c_5(\dot{y}_1 - \dot{x}_b + L\dot{\theta}) + \\
 k_6(y_2 - x_b - L\theta) + c_6(\dot{y}_2 - \dot{x}_b - L\dot{\theta}) - k_4(x_b - x_2) &= 0 \\
 M_b \ddot{x}_b + x_b(k_5 + k_6 + k_4) - \dot{x}_b(c_5 + c_6) + x_2k_4 + y_1k_5 + \\
 \dot{y}_1c_5 + y_2k_6 + \dot{y}_2c_6 - \theta(k_6L - k_5L) + \dot{\theta}(c_6L - c_5L) &= 0 \dots
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Persamaan *state variable* dari persamaan 3.1 adalah :

$$\dot{x}_b = \frac{1}{M_b} \begin{bmatrix} -x_b(k_4 + k_5 + k_6) - \dot{x}_b(c_5 + c_6) + x_2k_4 \\ + y_1k_5 + \dot{y}_1c_5 + y_2k_6 + \dot{y}_2c_6 - \theta(k_6L - k_5L) - \dot{\theta}(c_6L - c_5L) \end{bmatrix}$$

Persamaan gerak *rolling* pada *bogie* :

$$\begin{aligned}
 J\ddot{\theta}_b &= Fk_5L + Fc_5L - Fk_6L - Fc_6L \\
 J\ddot{\theta}_b &= k_5(y_1 - x_b + L\theta)L + c_5(\dot{y}_1 - \dot{x}_b + L\dot{\theta})L \\
 &\quad - k_6(y_2 - x_b - L\theta)L - c_6(\dot{y}_2 - \dot{x}_b - L\dot{\theta})L \\
 J\ddot{\theta}_b &= \begin{bmatrix} x_b(k_6 - k_5)L + \dot{x}_b(c_6 - c_5)L + y_1k_5L + \dot{y}_1c_5L - \\ y_2k_6L - \dot{y}_2c_6L + \theta(k_5L^2 + k_6L^2) + \dot{\theta}(c_5L^2 + c_6L^2) \end{bmatrix} \dots \dots
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

Persamaan *state variable* dari persamaan 3.2 adalah :

$$\ddot{\theta}_b = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} x_b(k_6 - k_5)L + \dot{x}_b(c_6 - c_5)L + y_1k_5L + \dot{y}_1c_5L - \\ y_2k_6L - \dot{y}_2c_6L + \theta(k_5L^2 + k_6L^2) + \dot{\theta}(c_5L^2 + c_6L^2) \end{bmatrix}$$

Persamaan gerak translasi pada massa 2 :

$$\begin{aligned}
 M_2 \ddot{X}_2 + Fk_2 + Fk_3 + Fc_1 - Fk_4 &= 0 \\
 M_2 \ddot{X}_2 + k_2(x_2 - x_1) + k_3(x_2 - x_c) + c_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - \\
 k_4(x_b - x_2) &= 0 \dots \dots \dots
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

Persamaan *state variable* dari persamaan 3.3 adalah:

$$\ddot{X}_2 = \frac{1}{M_2} [-x_2(k_2 + k_3 + k_4) - \dot{x}_2 c_1 + x_1 k_2 + \dot{x}_1 c_1 + x_c k_3 + x_b k_4]$$

Persamaan gerak translasi pada massa 1 :

$$M_1 \ddot{X}_1 + F k_1 - F c_1 - F k_2 = 0$$

$$M_1 \ddot{X}_1 + k_1(x_1 - x_c) - c_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_2(x_2 - x_1) = 0 \dots\dots\dots (3.4)$$

Persamaan state variable dari persamaan 3.4 adalah:

$$\dot{X}_1 = \frac{1}{M_1} [-x_1(k_1 + k_2) - \dot{x}_1 c_1 + x_2 k_2 + \dot{x}_2 c_1 + x_c k_1]$$

Persamaan gerak translasi pada massa *carbody* :

$$M_c \ddot{X}_c + F k_1 + F k_3 = 0$$

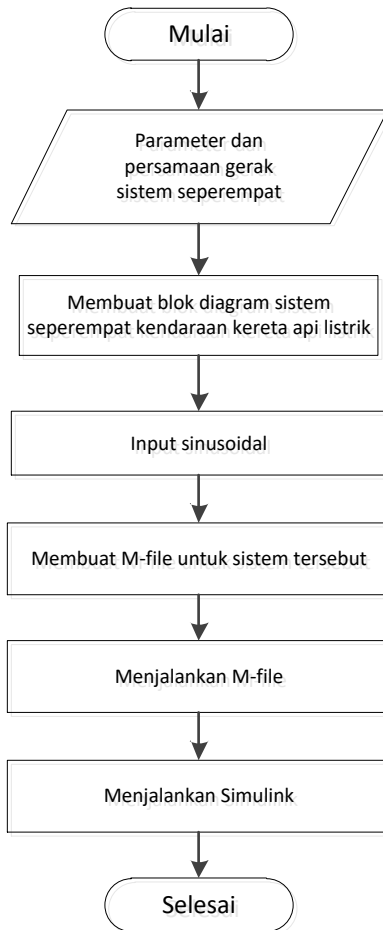
$$M_c \ddot{X}_c + k_1(x_c - x_1) + k_3(x_c - x_2) = 0 \dots\dots\dots (3.5)$$

Persamaan state variable dari persamaan 3.5 adalah :

$$\dot{X}_c = \frac{1}{M_c} [-x_c(k_1 + k_3) + x_1 k_1 + x_2 k_3]$$

### 3.3 Mendapatkan Respon Gerak *Carbody*

Setelah mendapatkan persamaan gerak dari sistem seperempat kendaraan, selanjutnya membuat blok diagram simulasi untuk sistem seperempat kendaraan kereta api pada *software* Simulink MATLAB. *Input* yang digunakan adalah *input* sinusoidal. Setelah melakukan simulasi, hasil yang keluar berupa grafik karakteristik dinamis sistem seperempat kendaraan untuk kedua sistem suspensi. Langkah yang digunakan variasi *input* sinusoidal dengan menggunakan nilai amplitudo sebesar 0.01, 0.02 dan 0.04 m dan variasi frekuensi yaitu 1.389 dan 1.944 Hz dimana variasi frekuensi ini di dapat dari perhitungan kecepatan kereta listrik yaitu 50 dan 70 Km/jam.



**Gambar 3.6** Diagram Alir Mendapatkan Respon Dinamis

Parameter yang digunakan pada sistem seperempat kendaraan kereta listrik antara lain

**Tabel 3.1** Parameter pada Sistem Seperempat Kendaraan Kereta Listrik

Parameter	Simbol	Nilai
Massa <i>bogie</i>	$M_b$	1.500 Kg
Massa <i>carbody</i>	$M_c$	15.000 Kg
Inersia <i>Bogie</i>	J	1130 Kg m <sup>2</sup>
Jarak Suspensi Primer	2L	2,4 m
Koefisien pegas <i>airspring</i>	$K_1$	82 x 10 <sup>4</sup> N/m
Koefisien kekakuan <i>reservoir</i>	$K_2$	48 x 10 <sup>4</sup> N/m
Koefisien kekakuan area	$K_3$	5 x 10 <sup>4</sup> N/m
Koefisien kekakuan tumpukan	$K_4$	10 <sup>7</sup> N/m
Koefisien pegas suspensi primer	$K_5$ & $K_6$	85,6 x 10 <sup>4</sup> N/m
Koefisien redaman suspensi primer	$C_5$ & $C_6$	1,38 x 10 <sup>4</sup> Ns/m

(halaman ini sengaja dikosongkan)

### 3.4 Perhitungan Potensi Energi yang Dapat di Panen

Pemodelan dan analisa persamaan gerak pada suspensi kereta listrik ini diharapkan dapat mengetahui besarnya potensi energi yang dapat dibangkitkan pada suspensi udara, dimana terjadi terdapat perbedaan posisi roda seperti yang terlihat pada gambar 3.4 yang akan menghasilkan gerak naik turun pada *bogie* dan *carbody* untuk diubah menjadi energi listrik.

Setelah mendapatkan respon dinamis maka dilakukan perhitungan daya dengan menggunakan respon kecepatan relatif dari massa 1 dan 2 ( $\dot{X}_{12}$ ) dan setelah itu di lakukan integrasi dari perhitungan daya tersebut sehingga mendapatkan perhitungan energi.

## **BAB IV**

### **ANALISA DAN PEMBAHASAN**

Bab ini akan menguraikan tentang analisa dan pembahasan respon dinamis dari pemodelan seperempat kereta listrik dengan suspensi udara yang nantinya akan dihitung potensi energy yang mampu dibangkitkan. Sebelum dilakukan analisa tentang potensi energy terbangkitkan dilakukan pemodelan dinamis terhadap kendaraan terlebih dahulu kemudian dengan menganalisa gaya-gaya yang bekerja pada model dinamis tersebut didapatkan persamaan gerak dari *bogie* dan *carbody* yang sudah dibahas pada bab sebelumnya. Dari persamaan gerak tersebut dibuat dalam bentuk *state variable* untuk kemudian dimasukkan kedalam diagram blok *Simulink* untuk dilakukan simulasi dan mendapatkan respon dinamisnya berupa grafik perpindahan, kecepatan dan percepatan dari *bogie* dan *carbody* akibat dari profil rel yang di diwakilkan dengan *input sinus soidal* dengan amplitude 0.01, 0.02 dan 0.04 meter dengan variasi kecepatan yaitu kecepatan rata-rata kereta yaitu 50 km/jam dan kecepatan maksimal 70 Km/jam.

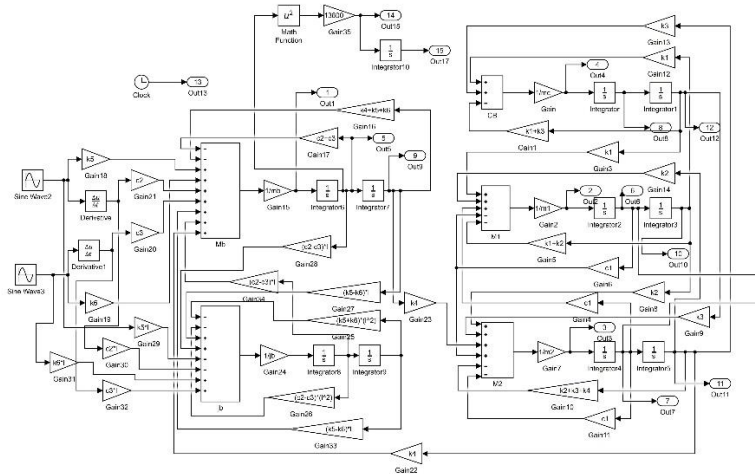
Pada laporan tugas akhir kali ini penulis akan menggunakan salah satu rute perjalanan kereta listrik sebagai dasar perbandingan energy yang dapat dipanen untuk setiap perjalanan kereta listrik lainnya, rute yang digunakan yaitu dari stasiun Tanah Abang (st.THAB) ke stasiun Rangkasbitung (st.RKS) dengan jarak 72,8 Km yang menempuh 19 stasiun dengan kecepatan rata-rata dari kereta listrik yaitu 50 Km/jam, dengan perhitungan ini diharap dapat menjadi perbandingan yang rill untuk perhitungan potensi energy dengan rute-rute lainnya. Adapun kecepatan maksimum yang dapat ditempuh dari kereta listrik yaitu 70 Km/jam juga akan disimulasikan sebagai pembanding energy pada kecepatan maksimum sedangkan variasi dari masa *carbody* hanya pada kondisi penuh.

#### 4.1 Blok Diagram Simulik

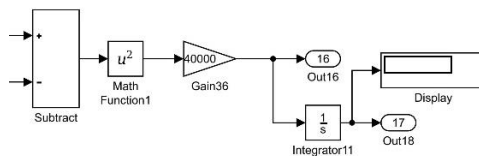
Pada bab sebelumnya telah di dapatkan persamaan gerak dari sistem seperempat kendaraan kereta listrik dengan menggambarkan *free body diagram* yang kemudian dianalisa gaya-gaya yang bekerja pada setiap masa, gambar 4.1 merupakan tampilan blok diagram sistem seperempat kendaraan kereta listrik sesuai dari persamaan yang sudah di dapat dalam bentuk 5 DOF (*degree of freedom*) dan gambar 4.2 merupakan diagram energi yang diambil dari kecepatan massa 1 dan massa 2.

Berikut ini akan di bahas secara singkat mengenai konfigurasi dari blok diagram sistem seperempat kendaraan kereta listrik yang ada dibawah ini dimana blok paling kiri merupakan blok input berupa sinusoidal dengan variasi amplitude yaitu 1, 2, dan 4 cm yang dihubungkan dengan blok *gain* yaitu kekakuan pegas suspense primer dan di sambungkan juga ke blok turunan (*derivative*) kemudian di sambung ke blok *gain* yang lain yaitu kekakuan redaman (*damper*) pada suspense primer yang kemudian disambungkan dengan blok *add* yang memiliki beberapa cabang bergantung pada persamaan *state variable* nya.

Pada blok diagram seperempat kendaraan kereta listrik memiliki 5 blok *add* yang berarti sistem memiliki 5 derajat kebebasan (*degree of freedom*) yang masing-masing di sambungkan dengan blok *integrator* untuk mendapatkan grafik perpindahan, kecepatan dan percepatannya kemudian memasukkan semua *gain* sesuai dengan persamaan yang di dapat pada penurunan rumus. Adapun parameter yang digunakan yaitu menggunakan Matlab editor dimana semua parameter dan *coding* dijadikan satu.



**Gambar 4.1** Diagram Blok Sistem Seperempat Kendaraan Kereta Listrik



**Gambar 4.2** Diagram Blok Energi Bangkitan Kereta Listrik

## 4.2 Respon Kereta akibat Profil Rel dengan Kecepatan 50 Km/jam

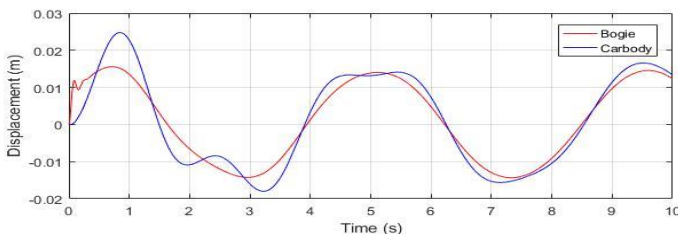
Dalam simulasi ini akan dihasilkan respon getaran kendaraan pada masing-masing variasi input. Inputan tersebut berbentuk sinus soidal dan respon getaran yang akan didapatkan berupa grafik perpindahan (*displacement*), kecepatan (*velocity*) dan percepatan (*acceleration*). Pada bab ini akan dibandingkan

masing-masing respon getaran berdasarkan inputan yang diberikan. Adapun macam-macam input tersebut adalah berupa profil jalanan sinus soidal dengan amplitude 0.01, 0.02, dan 0.04 meter dengan panjang gelombang 10 m dengan kecepatan kendaraan rata-rata 50 Km/jam dan kecepatan maksimum 70 Km/jam. Setelah itu akan dianalisa daya dan energy yang dapat dibangkitkan dari masing-masing grafik tersebut berupa grafik daya dan grafik energy.

Namun sebelum menganalisa energi bangkitan dari respon dinamis ini akan dilakukan perbandingan antara respon dinamis kereta listrik dengan respon dinamis kereta api dengan suspense konvensional dimana variasi kecepatan dan amplitude rel yang digunakan sama yaitu 50Km/jam dan 0,02 meter, maka di dapat grafik seperti dibawah ini.

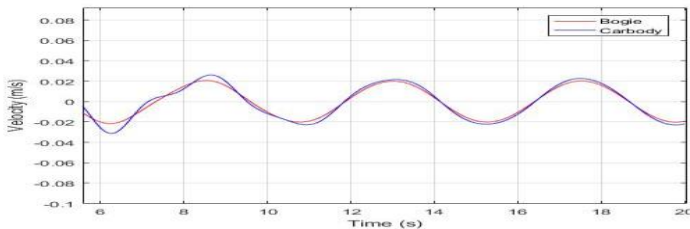
#### 4.2.1 Respon dinamis *Carbody* pada Eksitasi Sinusoidal dengan Amplitudo 0.02 m kecepatan 50 Km/jam dengan Suspensi Udara.

Berikut ini merupakan hasil simulasi pada kereta listrik dengan kecepatan 50 Km/jam melewati rel berupa sinusoidal dengan amplitudo 0.02 m. Gambar 4.3 menampilkan respon perpindahan *bogie* dan *carbody* sedangkan gambar 4.4 menampilkan respon kecepatan dari *bogie* dan *carbody*.



**Gambar 4.3** Grafik Respon Perpindahan (displacement) pada Eksitasi Sinusoidal  $A=0.02\text{m}$  dan  $V=50\text{ Km/jam}$  dengan Suspense Udara



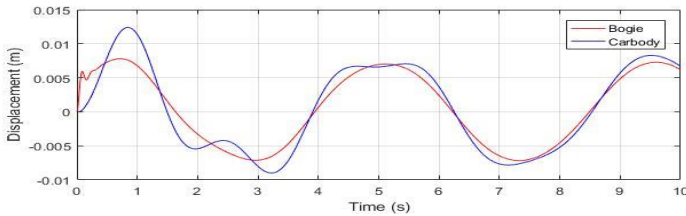


**Gambar 4.4** Grafik Respon Kecepatan (*velocity*) pada Eksitasi Sinusoidal  $A=0.02\text{m}$  dan  $V=50\text{ Km/jam}$  dengan Suspense Udara

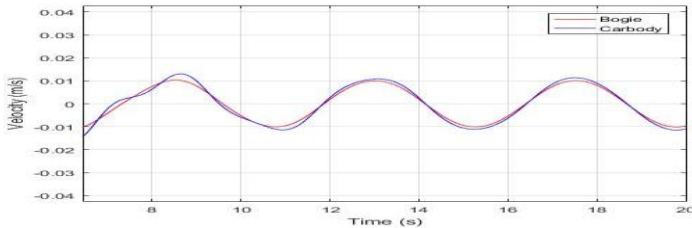
Grafik 4.3 merupakan grafik perpindahan dari *bogie* dan *carbody* dimana dari grafik diatas kita dapat mengetahui respon perpindahan maksimum *bogie* dan *carbody* akibat kontur rel yang dimodelkan sebagai sinusoidal dengan amplitudo  $0.02\text{ m}$  dan kecepatan kereta  $50\text{ Km/jam}$  didapat perpindahan maksimum dari *carbody* sebesar  $0.018\text{ m}$  sehingga di dapat perbandingan antara eksitasi dengan respon maksimum atau juga disebut *displacement transmissibility* sebesar  $1.11$ , sedangkan untuk grafik 4.4 merupakan grafik kecepatan dari *bogie* dan *carbody* dengan kontur rel yang sama didapat kecepatan maksimum dari *carbody* sebesar  $0.025\text{ m/s}$ .

#### 4.2.2 Respon *Bogie* dan *Carbody* pada Eksitasi Sinusoidal dengan Amplitudo $0.01\text{ m}$ kecepatan $50\text{ Km/jam}$ dengan Suspense Udara

Berikut ini merupakan hasil simulasi pada kereta listrik dengan kecepatan  $50\text{ Km/jam}$  melewati rel berupa sinusoidal dengan amplitudo  $0.01\text{ m}$ . Gambar 4.5 menampilkan respon perpindahan *bogie* dan *carbody* sedangkan gambar 4.6 menampilkan respon kecepatan dari *bogie* dan *carbody*.



**Gambar 4.5** Grafik Respon Perpindahan (*displacement*) pada Eksitasi Sinusoidal  $A=0.01\text{m}$  dan  $V=50\text{ Km/jam}$  dengan Suspense Udara



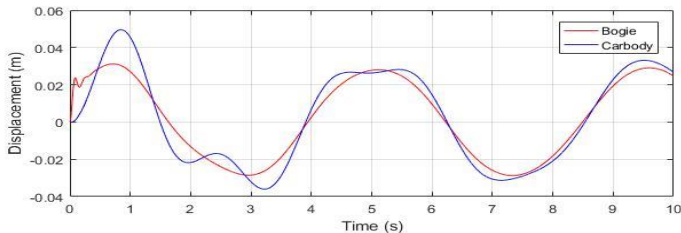
**Gambar 4.6** Grafik Respon Kecepatan (*velocity*) pada Eksitasi Sinusoidal  $A=0.01\text{m}$  dan  $V=50\text{ Km/jam}$  dengan Suspense Udara

Pada respon gerak diatas tren yang ditampilkan relative sama dengan grafik respon gerak sebelumnya ini dikarenakan eksitasi yang di berikan pada kedua sistem sama yaitu eksitasi sinusoidal namun perpindahan yang terjadi pada *bogie* dan *carbody* menjadi berbeda dengan grafik sebelumnya dimana pada grafik sebelumnya amplitude yang diberikan sebesar 0.02 m sedangkan pada simulasi ini diberikan amplitude 0.01 m sehingga perpindahan yang terjadi juga mendekati setengah kali dari grafik sebelumnya yaitu perpindahan *carbody* pada keadaan konvergen yaitu di 0.8 cm. Untuk grafik kecepatan dan percepatan *bogie* dan *carbody* juga relative sama dimana trennya tidak beraturan diawal dan mulai konvergen mengikuti tren grafik yang sebelumnya namun angka yang ditunjukkan yaitu setengah kali dari kecepatan dan percepatan dari grafik yang sebelumnya hal ini diakibatkan karena amplitude yang diberikan pada simulasi ini setengah kali

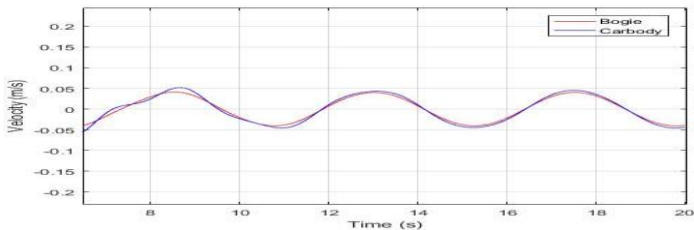
dari simulasi sebelumnya yaitu 0.01 m sehingga kecepatan *carbody* bernilai 1.25 cm/s pada keadaan konvergen.

#### 4.2.3 Respon *Bogie* dan *Carbody* pada Eksitasi Sinusoidal dengan Amplitudo 0.04 m kecepatan 50 Km/jam dengan Suspensi Udara

Berikut ini merupakan hasil simulasi pada kereta listrik dengan kecepatan 50 Km/jam melewati rel berupa sinusoidal dengan amplitudo 0.04 m. Gambar 4.7 menampilkan respon perpindahan *bogie* dan *carbody* sedangkan gambar 4.8 menampilkan respon kecepatan dari *bogie* dan *carbody*.



**Gambar 4.7** Grafik Respon Perpindahan (*displacement*) pada Eksitasi Sinusoidal  $A=0.04\text{m}$  dan  $V=50\text{ Km/jam}$  dengan Suspense Udara



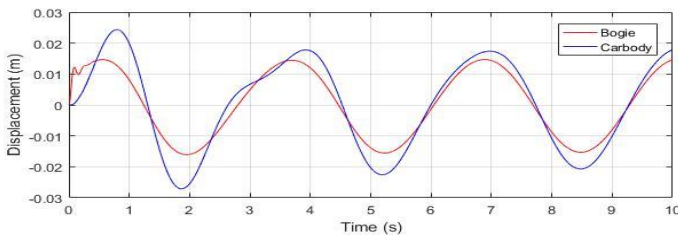
**Gambar 4.8** Grafik Respon Kecepatan (*velocity*) pada Eksitasi Sinusoidal  $A=0.04\text{m}$  dan  $V=50\text{ Km/jam}$  dengan Suspense Udara

Pada respon gerak diatas tren yang ditampilkan relative sama dengan grafik respon gerak sebelumnya ini dikarenakan eksitasi yang di berikan pada kedua sistem sama yaitu eksitasi

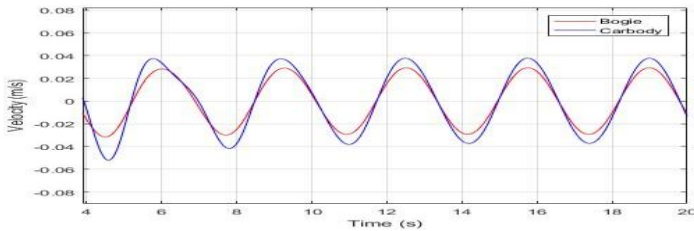
sinusoidal namun perpindahan yang terjadi pada *bogie* dan *carbody* menjadi berbeda dengan grafik sebelumnya dimana pada grafik sebelumnya amplitudo yang diberikan sebesar 0.01 m sedangkan pada simulasi ini diberikan amplitudo 0.04 m sehingga perpindahan yang terjadi juga mendekati empat kali lipat dari grafik sebelumnya yaitu perpindahan *carbody* pada keadaan konvergen sebesar di 3.2 cm. Untuk grafik kecepatan dan percepatan *bogie* dan *carbody* juga relative sama dimana trennya tidak beraturan diawal dan mulai konvergen mengikuti tren grafik yang sebelumnya namun angka yang ditunjukkan lebih besar dari kecepatan dan percepatan dari grafik yang sebelumnya hal ini diakibatkan karena amplitudo yang diberikan pada simulasi ini empat kali dari simulasi sebelumnya yaitu 0.04 m sehingga kecepatan *carbody* pada simulasi bernilai 5 cm/s pada keadaan konvergen sedangkan pada grafik percepatan respon konvergen  $6.66 \text{ cm/s}^2$ .

#### 4.2.4 Respon Dinamis *Carbody* pada Eksitasi Sinusoidal dengan Amplitudo 0.02 m kecepatan 70 Km/jam dengan Susensi Udara.

Berikut ini merupakan hasil simulasi pada kereta listrik dengan kecepatan 70 Km/jam melewati rel berupa sinusoidal dengan amplitudo 0.02 m. Gambar 4.9 menampilkan respon perpindahan *bogie* dan *carbody* sedangkan gambar 4.10 menampilkan respon kecepatan dari *bogie* dan *carbody*.



**Gambar 4.9** Grafik Respon Perpindahan (*displacement*) pada Eksitasi Sinusoidal  $A=0.02\text{m}$  dan  $V=70 \text{ Km/jam}$  dengan Suspense Udara

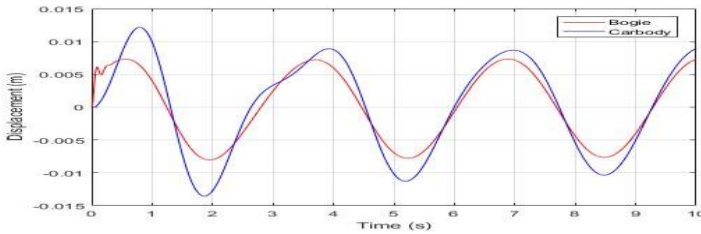


**Gambar 4.10** Grafik Respon Kecepatan (velocity) pada Eksitasi Sinusoidal  $A=0.02\text{m}$  dan  $V=70\text{ Km/jam}$  dengan Suspense Udara

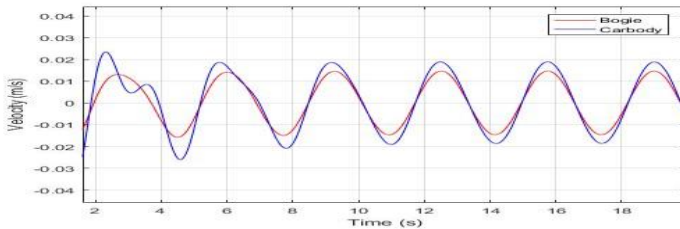
Grafik 4.9 merupakan grafik perpindahan dari *bogie* dan *carbody* dimana dari grafik diatas kita dapat mengetahui respon perpindahan maksimum *bogie* dan *carbody* akibat kontur rel yang dimodelkan sebagai sinusoidal dengan amplitudo  $0.02\text{ m}$  dan kecepatan kereta  $70\text{ Km/jam}$  didapat perpindahan maksimum dari *carbody* sebesar  $0.018\text{ m}$  sehingga di dapat perbandingan antara eksitasi dengan respon maksimum atau juga disebut *displacement transmissibility* sebesar  $1.11$ , sedangkan untuk grafik 4.10 merupakan grafik kecepatan dari *bogie* dan *carbody* dengan kontur rel yang sama didapat kecepatan maksimum dari *carbody* sebesar  $0.07\text{ m/s}$ .

#### **4.2.5 Respon *Bogie* dan *Carbody* pada Eksitasi Sinusoidal dengan Amplitudo $0.01\text{ m}$ kecepatan $70\text{ Km/jam}$ dengan Suspensi Udara**

Berikut ini merupakan hasil simulasi pada kereta listrik dengan kecepatan  $50\text{ Km/jam}$  melewati rel berupa sinusoidal dengan amplitudo  $0.01\text{ m}$ . Gambar 4.11 menampilkan respon perpindahan *bogie* dan *carbody* sedangkan gambar 4.12 menampilkan respon kecepatan dari *bogie* dan *carbody*.



**Gambar 4.11** Grafik Respon Perpindahan (*displacement*) pada Eksitasi Sinusoidal  $A=0.01\text{m}$  dan  $V=70\text{ Km/jam}$  dengan Suspense Udara



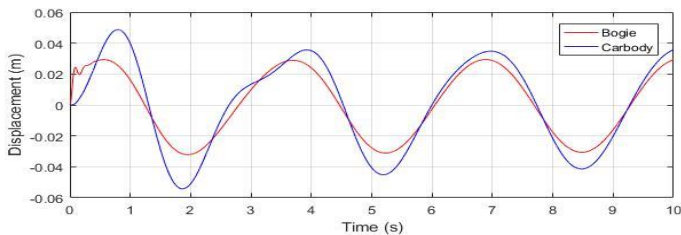
**Gambar 4.12** Grafik Respon Kecepatan (*velocity*) pada Eksitasi Sinusoidal  $A=0.01\text{m}$  dan  $V=70\text{ Km/jam}$  dengan Suspense Udara

Pada respon gerak diatas tren yang ditampilkan relative sama dengan grafik respon gerak sebelumnya ini dikarenakan eksitasi yang di berikan pada kedua sistem sama yaitu eksitasi sinusoidal namun perpindahan yang terjadi pada *bogie* dan *carbody* menjadi berbeda dengan grafik sebelumnya dimana pada grafik sebelumnya amplitude yang diberikan sebesar 0.02 m sedangkan pada simulasi ini diberikan amplitude 0.01 m sehingga perpindahan yang terjadi juga mendekati setengah kali dari grafik sebelumnya yaitu perpindahan *carbody* pada keadaan konvergen yaitu di 0.8 cm. Untuk grafik kecepatan dan percepatan *bogie* dan *carbody* juga relative sama dimana trennya tidak beraturan diawal dan mulai konvergen mengikuti tren grafik yang sebelumnya namun angka yang ditunjukkan yaitu setengah kali dari kecepatan dan percepatan dari grafik yang sebelumnya hal ini diakibatkan

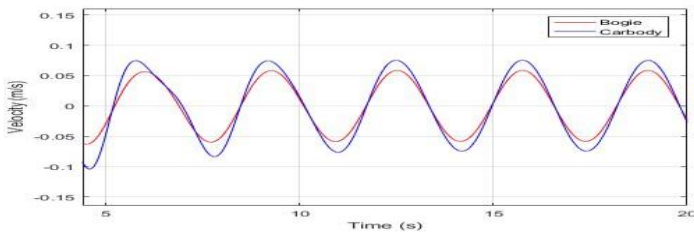
karena amplitudo yang diberikan pada simulasi ini setengah kali dari simulasi sebelumnya yaitu 0.01 m sehingga kecepatan *carbody* bernilai 2 cm/s pada keadaan konvergen sedangkan pada grafik percepatan respon konvergen 3.8 cm/s<sup>2</sup>.

#### 4.2.6 Respon *Bogie* dan *Carbody* pada Eksitasi Sinusoidal dengan Amplitudo 0.04 m kecepatan 70 Km/jam dengan Suspensi Udara.

Berikut ini merupakan hasil simulasi pada kereta listrik dengan kecepatan 70 Km/jam melewati rel berupa sinusoidal dengan amplitudo 0.04 m. Gambar 4.13 menampilkan respon perpindahan *bogie* dan *carbody* sedangkan gambar 4.14 menampilkan respon kecepatan dari *bogie* dan *carbody*.



**Gambar 4.13** Grafik Respon Perpindahan (*displacement*) pada Eksitasi Sinusoidal  $A=0.04\text{m}$  dan  $V=70\text{ Km/jam}$  dengan Suspense Udara



**Gambar 4.14** Grafik Respon Kecepatan (*velocity*) Pada Eksitasi Sinusoidal  $A=0.04\text{m}$  dan  $V=70\text{ Km/jam}$  dengan Suspense Udara

Pada respon gerak diatas tren yang ditampilkan relative sama dengan grafik respon gerak sebelumnya ini dikarenakan eksitasi yang di berikan pada kedua sistem sama yaitu eksitasi sinusoidal namun perpindahan yang terjadi pada *bogie* dan *carbody* menjadi berbeda dengan grafik sebelumnya dimana pada grafik sebelumnya amplitude yang diberikan sebesar 0.01 m sedangkan pada simulasi ini diberikan amplitude 0.04 m sehingga perpindahan yang terjadi juga mendekati empat kali lipat dari grafik sebelumnya yaitu perpindahan *carbody* pada keadaan konvergen sebesar di 3.75 cm. Untuk grafik kecepatan dan percepatan *bogie* dan *carbody* juga relative sama dimana trennya tidak beraturan diawal dan mulai konvergen mengikuti tren grafik yang sebelumnya namun angka yang ditunjukkan lebih besar dari kecepatan dan percepatan dari grafik yang sebelumnya hal ini diakibatkan karena amplitude yang diberikan pada simulasi ini empat kali dari simulasi sebelumnya yaitu 0.04 m sehingga kecepatan *carbody* pada simulasi bernilai 8 cm/s pada keadaan konvergen sedangkan pada grafik percepatan respon konvergen 15 cm/s<sup>2</sup>.

Setelah menunjukkan grafik respon dinamis dengan memvariasikan amplitude dari rel yaitu 0.01, 0.02, dan 0.04 m dan variasi kecepatan 50 dan 70 Km/jam maka di dapat 18 grafik berupa grafik perpindahan (*displacement*), kecepatan (*velocity*), dan percepatan (*acceleration*). Dan setelah ini akan dianalisa energy bangkitan dari setiap grafik diatas untuk ditarik kesimpulan yaitu apa saja yang mempengaruhi besarnya energi bangkita pada suspense kereta listrik.

Berikut ini tabel perbandingan respon dinamis antara kereta api dan kereta listrik pada kecepatan 50 Km/jam.

**Tabel 4.1** Perbandingan Respon Dinamis Kereta Api dengan Kereta Listrik pada Kecepatan 50 Km/jam

	A = 0.02 m	A = 0.01 m	A = 0.04 m
Perpindahan	1.8 cm	0.8 cm	3.2 cm



Kecepatan	2.5 cm/s	1.25 cm/s	5 cm/s
Percepatan	3.3 cm/s <sup>2</sup>	1.65 cm/s <sup>2</sup>	6.6 cm/s <sup>2</sup>

Berikut ini tabel perbandingan respon dinamis antara kereta api dan kereta listrik pada kecepatan 70 Km/jam.

**Tabel 4.2** Tabel 4.1 Perbandingan Respon Dinamis Kereta Api dengan Kereta Listrik pada Kecepatan 70 Km/jam

	A = 0.02 m	A = 0.01 m	A = 0.04 m
Perpindahan	1.8 cm	0.8 cm	3.75 cm
Kecepatan	4 cm/s	2 cm/s	8 cm/s
Percepatan	7.4 cm/s <sup>2</sup>	3.8 cm/s <sup>2</sup>	15 cm/s <sup>2</sup>

### 4.3 Potensi Daya dan Energi yang Mampu Terbangkitkan pada Suspensi Udara

Untuk menghitung energi yang mampu terbangkitkan dilakukan perhitungan daya terlebih dahulu dengan persamaan 4.1 selanjutnya dengan mengintegrasikan sepanjang waktu yang di tentukan di dapatkan persamaan 4.2 untuk menghitung energi yang dapat dipanen masih menggunakan *software Simulink*. Grafik kecepatan yang digunakan pada perhitungan daya adalah grafik kecepatan relatif antara massa 1 dan massa 2 yaitu pada kecepatan 50 Km/jam dan 70 Km/jam dengan variasi rel berupa input sinusoidal dengan amplitude 0.01, 0.02, dan 0.04 m, sedangkan komponen yang akan dianalisa yaitu energi bangkitan pada peredam dari suspense udara saja dengan menggunakan perhitungan daya sama dengan gaya redaman yang terjadi kemudian dikali kan dengan kecepatan dari respon dinamisnya, atau dapat dituliskan :

$$P = F_d \dot{X}_{12} = c \dot{X}_{12} \cdot \dot{X}_{12} = c \dot{X}_{12}^2 \dots\dots\dots (4.1)$$

$$E = P t \dots\dots\dots (4.2)$$

keterangan,    P    = Daya (watt)  
                       E    = Energi (Joule)  
                       F<sub>d</sub>   = Gaya redam (N)

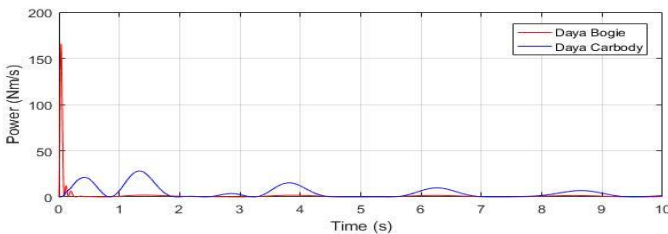
$c$  = Koefisien redaman (Ns/m)

$\dot{X}_{12}$  = kecepatan relatif massa 1 dan massa (m/s)

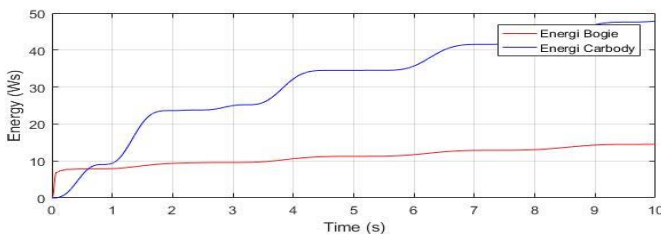
Sedangkan energi yang dibangkitkan di dapat dengan mengintegalkan daya tersebut.

#### 4.3.1 Potensi Energi pada Suspensi Udara pada kecepatan 50 Km/jam

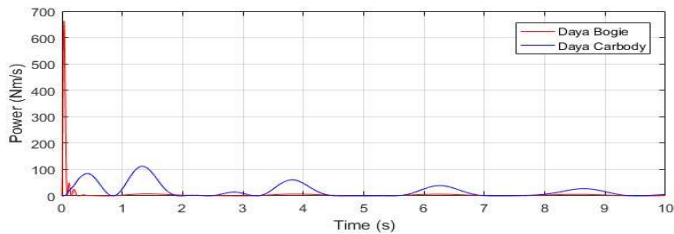
Berikut ini merupakan hasil simulasi energi bangkitan pada kecepatan 50 Km/jam pada amplitudo 0.01 yaitu gambar 4.15 yaitu daya bangkitan dan gambar 4.16 untuk energi bangkitan sedangkan pada amplitudo 0.02 m yaitu pada gambar 4.17 untuk daya bangkitan dan gambar 4.18 untuk energi bangkitan, dan yang terakhir yaitu pada amplitudo 0.04 m yaitu pada gambar 4.19 untuk daya bangkitan dan gambar 4.20 untuk energi bangkitan.



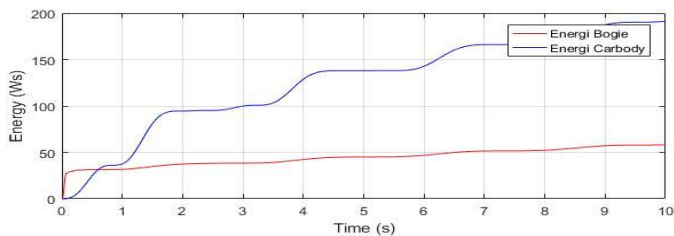
**Gambar 4.15** Grafik Daya Bangkitan pada Eksitasi Sinusoidal  
A=0.01m dan V=50 Km/jam



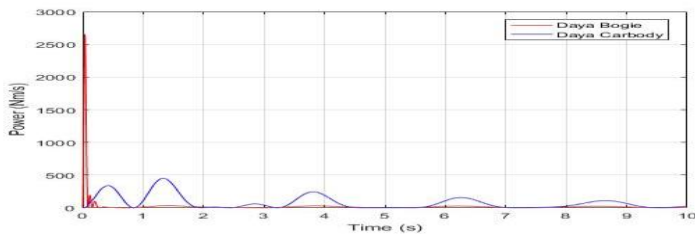
**Gambar 4.16** Grafik Energi Bangkitan pada Eksitasi Sinusoidal  
A=0.01m dan V=50 Km/jam



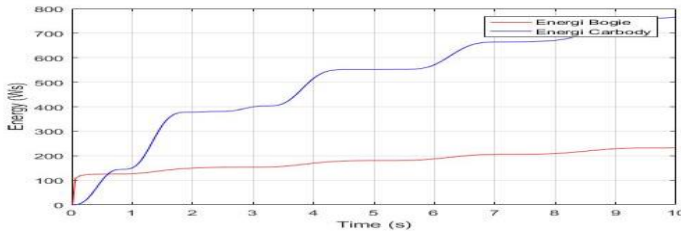
**Gambar 4.17** Grafik Daya Bangkitan pada Eksitasi Sinusoidal  
 $A=0.02\text{m}$  dan  $V=50\text{ Km/jam}$



**Gambar 4.18** Grafik Energi Bangkitan pada Eksitasi Sinusoidal  
 $A=0.02\text{m}$  dan  $V=50\text{ Km/jam}$



**Gambar 4.19** Grafik Daya Bangkitan pada Eksitasi Sinusoidal  
 $A=0.04\text{m}$  dan  $V=50\text{ Km/jam}$

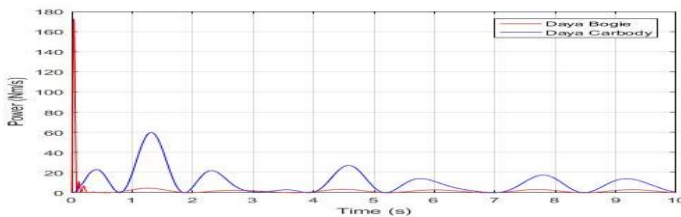


**Gambar 4.20** Grafik Energi Bangkitan pada Eksitasi Sinusoidal  
 $A=0.04\text{m}$  dan  $V=50\text{ Km/jam}$

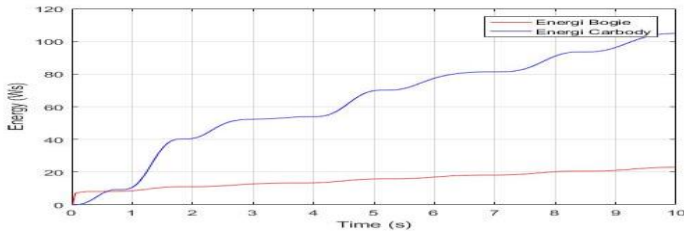
Grafik di atas merupakan grafik daya dan energi yang mampu terbangkitkan pada kecepatan operasional kereta listrik yaitu  $50\text{ Km/jam}$  dengan variasi amplitudo rel  $0.01$ ,  $0.02$ , dan  $0.04$  meter, dimana dapat dilihat bahwa tren yang dimiliki ketiga grafik daya sama persis hanya hasil yang di dapat berbeda dimana daya dan energi terbesar di dapat pada amplitudo rel sebesar  $0.04$  meter karena mengakibatkan terjadinya respon dinamis yang juga besar.

#### 4.3.2 Potensi Energi pada Suspensi Udara pada kecepatan $70\text{ Km/jam}$

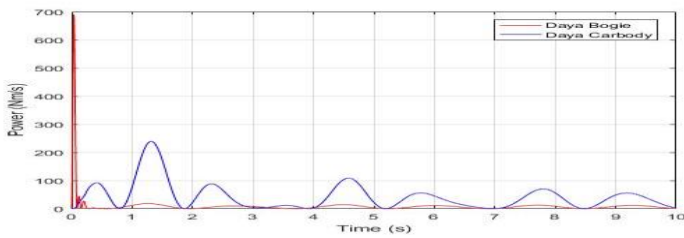
Berikut ini merupakan hasil simulasi energi bangkitan pada kecepatan  $70\text{ Km/jam}$  pada amplitudo  $0.01$  yaitu gambar 4.21 yaitu daya bangkitan dan gambar 4.22 untuk energi bangkitan sedangkan pada amplitudo  $0.02\text{ m}$  yaitu pada gambar 4.23 untuk daya bangkitan dan gambar 4.24 untuk energi bangkitan, dan yang terakhir yaitu pada amplitudo  $0.04\text{ m}$  yaitu pada gambar 4.25 untuk daya bangkitan dan gambar 4.26 untuk energi bangkitan



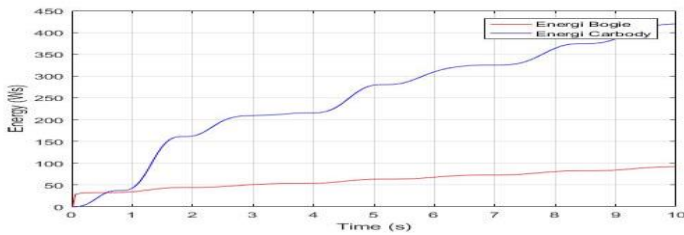
**Gambar 4.21** Grafik Daya Bangkitan pada Eksitasi Sinusoidal  
 $A=0.01\text{m}$  dan  $V=70\text{ Km/jam}$



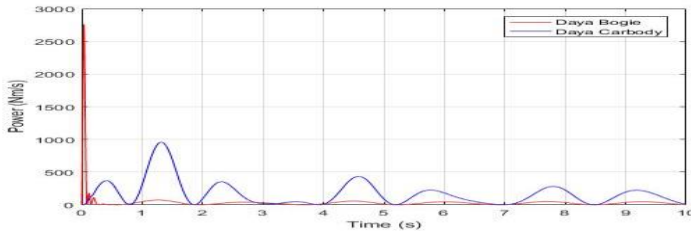
**Gambar 4.22** Grafik Energi Bangkitan pada Eksitasi Sinusoidal  
 $A=0.01\text{m}$  dan  $V=70\text{ Km/jam}$



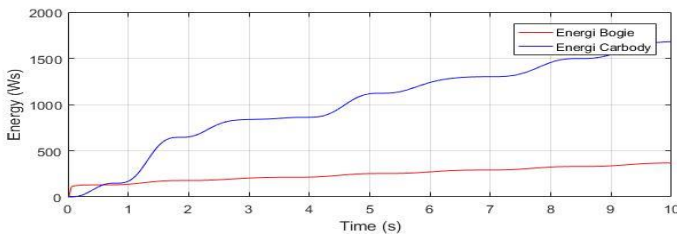
**Gambar 4.23** Grafik Daya Bangkitan pada Eksitasi Sinusoidal  
 $A=0.02\text{m}$  dan  $V=70\text{ Km/jam}$



**Gambar 4.24** Grafik Energi Bangkitan pada Eksitasi Sinusoidal  
 $A=0.02\text{m}$  dan  $V=70\text{ Km/jam}$



**Gambar 4.25** Grafik Daya Bangkitan pada Eksitasi Sinusoidal  
 $A=0.04\text{m}$  dan  $V=70\text{ Km/jam}$



**Gambar 4.26** Grafik Energi Bangkitan pada Eksitasi Sinusoidal  
 $A=0.04\text{m}$  dan  $V=70\text{ Km/jam}$

Grafik diatas merupakan grafik daya dan energi bangkitan dari kereta api dengan kecepatan maksimum 70 Km/jam dengan variasi amplitudo rel yaitu 0.01, 0.02, dan 0.04 meter, dimana dapat diperhatikan bahwa tren yang terbentuk dari ketiga kondisi tersebut sama hanya jumlah energi yang di dapat berbeda dimana energi terbesar terjadi pada amplitudo 0.04 meter di sebabkan karena respon dinamis yang terjadi juga besar atau berbanding lurus dengan amplitudo yang diberikan.

Berikut ini merupakan tabel energi bangkitan yang terjadi dengan variasi amplitudo rel yaitu 0.01, 0.02 dan 0.04 meter dan kecepatan kereta listrik 50 Km/jam dan 70 Km/jam dengan menggunakan nilai RMS (*root mean square*) pada Matlab:

**Tabel 4.3** Energi Bangkitan

Amplitudo rel (m)	Energi Bangkitan (watt)	
	v = 50 Km/jam	v = 70 Km/jam
0.01	12.57	16.01
0.02	47.68	64.06
0.04	201.18	256.23

*(halaman ini sengaja dikosongkan)*



## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisa terhadap respon gerak model seperempat kendaraan kereta listrik dengan menggunakan suspense udara pada program *Simulink* Matlab dapat disimpulkan bahwa :

1. Model dinamis yang digunakan pada suspense udara kereta listrik adalah model *Vampire* dimana model ini memiliki 5 derajat kebebasan (*Degree of Freedom*) yang mendekati model fisik suspense udara.
2. Perbandingan respon gerak kereta listrik dengan variasi kecepatan dan amplitude ditampilkan pada tabel 5.1 dan tabel 5.2 berikut ini :

**Tabel 5.1** Perbandingan Respon Gerak Kereta Api dan Kereta Listrik pada Kecepatan 50 Km/jam

	A = 0.02 m	A = 0.01 m	A = 0.04 m
Perpindahan	1.8 cm	0.8 cm	3.2 cm
Kecepatan	2.5 cm/s	1.25 cm/s	5 cm/s
Percepatan	3.3 cm/s <sup>2</sup>	1.65 cm/s <sup>2</sup>	6.6 cm/s <sup>2</sup>

**Tabel 5.2** Perbandingan Respon Gerak Kereta Api dan Kereta Listrik pada Kecepatan 70 Km/jam

	A = 0.02 m	A = 0.01 m	A = 0.04 m
Perpindahan	1.8 cm	0.8 cm	3.75 cm
Kecepatan	2 cm/s	2 cm/s	8 cm/s
Percepatan	7.4 cm/s <sup>2</sup>	3.8 cm/s <sup>2</sup>	15 cm/s <sup>2</sup>

3. Energi bangkitan pada suspense udara kereta listrik berbanding lurus dengan kecepatan dan amplitude rel yang diberikan dimana energi bangkitan terbesar terjadi

pada kecepatan 70 Km/jam dengan amplitude rel sebesar 0.04 meter yaitu sebesar 256.23 watt.

## **5.2 Saran**

Saran yang bisa diajukan setelah pengerjaan tugas akhir ini adalah:

1. Sebaiknya di siapkan data konstanta pegas dan redaman pada variasi tekanan suspense udara untuk membandingkan energi bangkitan pada variasi masa penumpang.
2. Pada penelitian selanjutnya, sebaiknya dilakukan pemilihan alat penangkap energi untuk mengetahui energi bangkitan aktual.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Dokumen Pribadi PT. INKA. **PT. Industri Kereta Api Indonesia**. Madiun, Indonesia.
- [2] Rao, S.S. 2011. **Mechanical Vibrations Fifth Edition**. Miami: Pearson Education, Inc.
- [3] Laura, M. dan Mats, B. 2012. **Secondary Suspension of Railway Vehicles – Air Spring Modelling: Performance and Critical Issues**. Milan, Italy.
- [4] Stefano, B., Jordi, V., Mats, B.O., dan Sebastian, S. 2016 **Modelling of Suspension Components in a Rail Vehicle Dynamics Context**. UK.
- [5] Raharjo, A. 2009. **Analisa Karakteristik Getaran Suspensi Air Spring pada Kendaraan Bus**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
- [6] Natalie, D. 2012. **Pemodelan dan Analisa Dinamika (Potensi Energi Terbangkitkan) pada Gerak Vartikel antar Gerbong Kereta Api**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
- [7] Permana, D. I. A. 2018. **Redesign Sistem Peredam Sekunder dan Analisa Pengaruh Variasi Nilai Koefisien Redam Terhadap Respon Dinamis Kereta Api K3**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
- [8] Harrop, P. 2016. **Regenerative Suspension comes center stage**.  
<URL:<https://www.idtechex.com/research/articles/regenerative-suspension-comes-center-stage-00009408.asp>>.
- [9] Noel, Marie-Hélène. 2014. **Guidelines for Braking Energy Recovery System in Urban Rail Networks**.  
<URL:[https://www.tickettokyoto.eu/sites/default/files/downloads/T2K\\_WP2B\\_Energy%20Recovery\\_Final%20Report\\_0.pdf](https://www.tickettokyoto.eu/sites/default/files/downloads/T2K_WP2B_Energy%20Recovery_Final%20Report_0.pdf)>.
- [10] Mazzola, Laura. 2016. **Secondary Suspension of Railway Vehicles Air Spring Modelling Performance**

**and Critical Issues.**  
 <URL:<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0954409712470641>>.

- [11] Prahasto, Toni. 2017. **Silabus Teknik Kereta Api dan Transportasi.**  
 <URL:<http://railwaytransport.blogspot.com/>>.
- [12] Quora. 2016. **What Type of Suspension System is Used in Different Types of Train Coaches.**  
 <URL:<https://www.quora.com/What-type-of-suspension-system-is-used-in-different-types-of-train-coaches>>.
- [13] Irwana, Fandi. 2016. **Superposisi Getaran Harmonik.**  
 <URL:<https://irwanafandiblog.wordpress.com/2015/11/26/superposisi-getaran-harmonik/>>

## BIODATA PENULIS



Penulis lahir dari keturunan Batak (Sumatera Utara) di Bekasi, 26 Mei 1996 yang merupakan anak kedua dari 3 bersaudara. Penulis selama hidupnya telah menempuh pendidikan formal di SD Negeri 4 Maja, SMP Negeri 1 Maja, dan SMA Negeri 1 Rangkasbitung. Setelah tamat pendidikan SMA tahun 2013, penulis melanjutkan pendidikan tingkat sarjana di kampus Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS), jurusan Teknik Mesin berkat beasiswa Bidik Misi dari pemerintah.

Di kampus ITS, penulis aktif dalam organisasi UKM Taekwondo ITS dan menjadi ketua umum periode 2014-2015, selain di UKM Taekwondo penulis juga aktif kegiatan di jurusan Teknik Mesin dan pernah menjadi *instruction committee* (IC) kegiatan POROS 2014 selain itu penulis juga menjadi guru les SMA di beberapa lembaga bimbingan belajar. Di bulan September 2017 penulis mengikuti kegiatan dari Kemenristek Dikti yaitu Perusahaan Pemula Berbasis Teknologi (PPBT) 2018 dan mendapat kesempatan untuk membangun perusahaan dari dana hibah Kemenristek Dikti, penulis sangat berterimakasih atau semua kesempatan yang diberikan dari Kemenristek Dikti mulai dari beasiswa kuliah dan kesempatan membangun perusahaan.

Berpegangan pada motto hidup “*Kita tidak pernah tau batas kemampuan kita, yang kita tau hanya batas kemauan kita*” memberikan semangat bagi penulis untuk melakukan hal-hal baru yang lebih menantang untuk bisa meningkatkan kemampuan menjadi lebih baik lagi. Penulis merasa terbuka dengan adanya kritik dan saran untuk memperbaiki Tugas Akhir ini atau sekedar bertanya seputar buku ini dapat dikirimkan melalui email [r.evalga@yahoo.co.id](mailto:r.evalga@yahoo.co.id).